



**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID**  
**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**

**Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática**

**PROYECTO FIN DE CARRERA**

**RECONSTRUCCIÓN DEL ENTORNO  
MEDIANTE  
REJILLAS DE OCUPACIÓN**

**Autor: José Luis Buedo Domínguez**

**Tutor: Fernando García Fernández**

*Marzo 2012*

## ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN .....	2
1.1.	OBJETIVOS A DESARROLLAR .....	4
1.2.	ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO .....	5
2.	ESTADO DEL ARTE .....	7
2.1.	COCHES INTELIGENTES .....	7
2.2.	SISTEMAS DE AYUDA A LA CONDUCCIÓN .....	8
2.3.	SISTEMAS COOPERATIVOS PARA LA SEGURIDAD EN CARRETERA .....	13
2.4.	CONSTRUCCIÓN DE MAPAS .....	16
2.4.1.	MAPAS MÉTRICOS .....	17
2.4.1.1.	MAPAS BASADOS EN REJILLAS DE OCUPACIÓN .....	18
2.4.1.2.	MAPAS GEOMÉTRICOS .....	19
2.4.2.	MAPAS TOPOLÓGICOS .....	20
3.	ARQUITECTURA HARDWARE.....	22
3.1.	TELÉMETRO LÁSER SICK LMS291-S05 .....	22
3.1.1.	FUNCIONAMIENTO .....	23
3.1.2.	VENTAJAS E INCONVENIENTES DEL TELÉMETRO LÁSER .....	25
3.1.3.	APLICACIONES.....	25
3.1.4.	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS.....	27
3.2.	CONVERSOR SERIE USB .....	27
3.3.	ALIMENTACIÓN .....	28
4.	ARQUITECTURA SOFTWARE.....	30
4.1.	LIBRERÍA DE ROBÓTICA: MRPT.....	30
4.1.1.	COBSERVATION2DRANGESCAN .....	31
4.1.2.	CSIMPLEPOINTSMAP .....	32
4.1.3.	COCCUPANCYGRIDMAP2D .....	33
4.1.4.	CIMAGE .....	34
4.1.5.	CDISPLAYWINDOWPLOTS.....	35
4.2.	LIBRERÍA DE VISIÓN POR COMPUTADOR: OPENCV .....	35
4.3.	COMUNICACIÓN SOFTWARE CON EL TELÉMETRO LÁSER .....	36
4.3.1.	ESTRUCTURA GENERAL DE LOS PAQUETES .....	36
4.3.2.	PROTOCOLO DE COMUNICACIONES .....	37
4.3.2.1.	PAQUETE DE CAMBIO DE VELOCIDAD .....	37
4.3.2.2.	RESPUESTA AL CAMBIO DE VELOCIDAD .....	37
4.3.2.3.	PAQUETE DE INICIALIZACIÓN.....	38
4.3.2.4.	RESPUESTA AL PAQUETE DE INICIALIZACIÓN.....	38
4.3.2.5.	PETICIÓN SIMPLE DE DATOS .....	38
4.3.2.6.	RESPUESTA A PETICIÓN SIMPLE DE DATOS.....	39
4.3.2.7.	PETICIÓN DE DATOS CONTINUA .....	41
4.3.2.8.	RESPUESTA A PETICIÓN DE DATOS CONTINUA .....	41
4.3.2.9.	FIN DE MODO CONTINUO .....	41
4.3.2.10.	RESPUESTA A FIN DE MODO CONTINUO .....	42
4.3.3.	FLUJOGRAMA DE FUNCIONAMIENTO .....	42
5.	IMPLEMENTACIÓN .....	45

5.1.	ESQUEMA GENERAL DE IMPLEMENTACIÓN.....	45
5.2.	OBTENCIÓN DE DATOS PROCEDENTES DEL TELÉMETRO LÁSER.....	45
5.2.1.	OBTENCIÓN DE DATOS EN DIFERIDO .....	46
5.2.2.	OBTENCIÓN DE DATOS EN TIEMPO REAL.....	47
5.3.	REPRESENTACIÓN DEL GRID MAP.....	48
5.3.1.	CREACIÓN DE LA OBSERVACIÓN DEL TELÉMETRO LÁSER .....	49
5.3.2.	REPRESENTACIÓN DE PUNTOS EN EJE DE COORDENADAS XY .....	50
5.3.3.	CREACIÓN DEL GRID MAP .....	51
5.3.4.	VISUALIZACIÓN DEL GRID MAP .....	52
5.4.	DETECCIÓN DE MOVIMIENTO .....	53
5.4.1.	ALGORITMO DE DETECCIÓN DE MOVIMIENTO .....	53
5.4.2.	REPRESENTACIÓN DE OBSTÁCULOS EN MOVIMIENTO .....	57
6.	RESULTADOS.....	60
6.1.	REPRESENTACIÓN DE PUNTOS EN EL EJE DE COORDENADAS XY .....	61
6.2.	REJILLAS DE OCUPACIÓN: GRID MAPS HISTÓRICO Y ACTUAL .....	62
6.3.	MAPA DETECCIÓN DE MOVIMIENTO .....	63
6.4.	SECUENCIAS GRABADAS: CIRCUITO DE PRUEBAS INSIA .....	65
6.4.1.	SECUENCIA I9: APROXIMACIÓN FRONTAL DE UN VEHÍCULO .....	65
6.4.2.	SECUENCIA I21: DOS VEHÍCULOS CIRCULANDO EN SENTIDOS OPUESTOS.....	66
6.4.3.	SECUENCIA I21: TRAYECTORIA SEGUIDA POR AMBOS VEHÍCULOS.....	68
6.4.4.	SECUENCIA I23: DOS VEHÍCULOS CIRCULANDO EN PARALELO.....	69
6.4.5.	SECUENCIA I25: ADELANTAMIENTO ENTRE VEHÍCULOS.....	71
6.4.6.	SECUENCIA M42: APROXIMACIÓN FRONTO-LATERAL DE UN VEHÍCULO.....	73
6.5.	RESULTADOS OBTENIDOS EN TIEMPO REAL .....	74
6.5.1.	CAPTURA EN TIEMPO DE EJECUCIÓN EN TIEMPO REAL.....	74
6.5.2.	SECUENCIA GRABADA EN TIEMPO REAL.....	75
6.6.	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.....	76
7.	PRESUPUESTO .....	78
7.1.	COSTE DE MATERIAL .....	78
7.2.	COSTE DE PERSONAL.....	78
7.3.	PRESUPUESTO TOTAL.....	78
8.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS .....	80
8.1.	CONCLUSIONES .....	80
8.2.	TRABAJOS FUTUROS .....	80
9.	BIBLIOGRAFÍA .....	82

## ANEXOS

I.	MAPEADO MEDIANTE REJILLAS O CELDAS DE OCUPACIÓN .....	86
A.	BASE TEÓRICA .....	86
B.	APRENDIZAJE INVERSO EN LOS MODELOS DE MEDIDA .....	88
C.	CRITERIO MAP (MAPEADO DE OCUPACIÓN MÁXIMA A POSTERIORI).....	89
II.	GUÍA DE INSTALACIÓN DE LA LIBRERÍA DE ROBÓTICA: MRPT .....	91
III.	HOJA DE CARACTERÍSTICAS: SICK LMS 291 S05 [SICK] .....	94

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Transporte cotidiano en algunos países europeos [Calz].....	2
Ilustración 2. Número de vehículos por cada 1000 habitantes (años 1985-2010) [DGTest]. .....	3
Ilustración 3. Coche inteligente Universidad Carlos III de Madrid.....	4
Ilustración 4. Coche inteligente de Google. ....	7
Ilustración 5. Detección de ángulo muerto.....	9
Ilustración 6. Funcionamiento de Control de Crucero Adaptativo. ....	10
Ilustración 7. Trazada correcta con ESP. ....	11
Ilustración 8. Sistema de visión nocturna. ....	12
Ilustración 9. Funcionamiento del sistema e-Call. ....	14
Ilustración 10. Asistente de cruces. ....	15
Ilustración 11. Percepción del entorno del coche autónomo de Google. ....	17
Ilustración 12. Ejemplo de rejilla de ocupación [Thrun]. ....	18
Ilustración 13. Ejemplo de modelo geométrico del entorno [Gallar99]. ....	19
Ilustración 14. Ejemplo de mapa topológico de Kuipers [Gallar99].....	20
Ilustración 15. Esquema de la arquitectura hardware empleada. ....	22
Ilustración 16. Telémetro láser SICK LMS 291.....	22
Ilustración 17. Secuencia de funcionamiento del espejo interno del láser [LIDAR]. ....	23
Ilustración 18. Barrido (180°) del láser.....	23
Ilustración 19. Barrido (100°) del láser.....	24
Ilustración 20. Comportamiento del láser para un escaneo simple de resolución 0,25°. ....	24
Ilustración 21. Especificaciones técnicas SICK LMS 291.....	27
Ilustración 22. Conversor serie USB Redcom [REDCOM]. ....	27
Ilustración 23. Librerías MRPT.....	30
Ilustración 24. Clase CObservation2DRangeScan. ....	31
Ilustración 25. Clase CSimplePointsMap.....	32
Ilustración 26. Clase COccupancyGridMap2D.....	33
Ilustración 27. Clase CImage. ....	34
Ilustración 28. Clase CDisplayWindowPlots. ....	35
Ilustración 29. Campo de visión modo 100°. ....	39
Ilustración 30. Flujograma de funcionamiento del programa de comunicaciones.....	42
Ilustración 31. Ejemplo de puntos en ejes XY. ....	50
Ilustración 32. Ejemplo de grid map. ....	52
Ilustración 33. Dibujo ilustrativo: Base del algoritmo de detección de movimiento.....	53
Ilustración 34. Dibujo ilustrativo del grid map actual en la detección de movimiento. ....	54
Ilustración 35. Ventana creada para representar obstáculos en movimiento. ....	58
Ilustración 36. Ventana detección de obstáculos con mensaje de alerta.....	58
Ilustración 37. Ejemplo de la aplicación en tiempo de ejecución. ....	60
Ilustración 38. Ejemplos de puntos representados en ejes XY. ....	61
Ilustración 39. Representación de grid maps histórico y actual. ....	62
Ilustración 40. Representación de detección de movimiento (i). ....	63
Ilustración 41. Representación de detección de movimiento (ii). ....	63
Ilustración 42. Representación de detección de movimiento (iii). ....	64
Ilustración 43. Representación de detección de movimiento (iv). ....	64

Ilustración 44. Ejemplo Secuencia i9 [Aproximación frontal de un vehículo].....	65
Ilustración 45. Ejemplo.A. Secuencia i21 [Dos vehículos circulando en sentidos opuestos]. ....	66
Ilustración 46. Ejemplo.B. Secuencia i21 [Dos vehículos circulando en sentidos opuestos]. ....	67
Ilustración 47. Trayectoria de ambos vehículos.....	68
Ilustración 48. Ejemplo.A. Secuencia i23 [Dos vehículos circulando en paralelo]. ....	69
Ilustración 49. Ejemplo.B. Secuencia i23 [Dos vehículos circulando en paralelo]. ....	70
Ilustración 50. Ejemplo.A. Secuencia i25 [Adelantamiento entre vehículos]. ....	71
Ilustración 51. Ejemplo.B. Secuencia i25 [Adelantamiento entre vehículos]. ....	72
Ilustración 52. Ejemplo Secuencia m42 [Aproximación fronto-lateral de un vehículo]. ....	73
Ilustración 53. Captura en tiempo de ejecución (pruebas en tiempo real). ....	74
Ilustración 54. Ejemplo prueba realizada en tiempo real. ....	75
Ilustración 55. Gráfico presupuesto final. ....	78
Ilustración 56. Características SICK LMS 291.....	94
Ilustración 57. Datos técnicos [I] SICK LMS 291. ....	95
Ilustración 58. Datos técnicos [II] SICK LMS 291. ....	96

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Consumo total del proyecto. ....	28
Tabla 2. Estructura de los paquetes. ....	36
Tabla 3. Paquete de cambio de velocidad en la transmisión. ....	37
Tabla 4. Codificación de la velocidad del telémetro láser en comando 0x20. ....	37
Tabla 5. Paquete de respuesta a cambio de velocidad en la transmisión. ....	37
Tabla 6. Mensaje de petición de estado. ....	38
Tabla 7. Mensaje de estado. ....	38
Tabla 8. Mensaje de petición de datos. ....	38
Tabla 9. Respuesta a petición simple. ....	39
Tabla 10. 401 puntos para configuración 100° y resolución 0,25°. ....	39
Tabla 11. Codificación de distancias [i]. ....	40
Tabla 12. Codificación de distancias [ii]. ....	40
Tabla 13. Cambio de modo a petición continua. ....	41
Tabla 14. Byte de respuesta al cambio de modo de operación. ....	41
Tabla 15. Comando de cambio a modo bajo petición. ....	41
Tabla 17. Coste de material. ....	78
Tabla 18. Coste de personal. ....	78
Tabla 19. Presupuesto total. ....	78



# **Capítulo 1.**

# **Introducción**



## 1. INTRODUCCIÓN

Conducir es fundamental para nuestra vida. De ello depende poder llegar al trabajo, tener nuestros productos entregados a tiempo, irse de vacaciones... Sin embargo, la conducción también tiene sus problemas, como: los atascos, el impacto ambiental, y los accidentes. Europa con más de 300 millones de conductores desea poder conducir de forma más fácil, con menos problemas, menos demoras, y sobre todo, con menos probabilidades de tener un accidente.

Las tecnologías de la información y la comunicación permiten la construcción de infraestructuras y vehículos inteligentes, ofreciendo avanzadas soluciones para el transporte diario. Los sistemas inteligentes, denominados ADAS (siglas en inglés de Sistemas Avanzados de Ayuda a la Conducción), pueden ayudar al conductor en las funciones de conducción, previniendo, evitando o mitigando accidentes, pudiendo ofrecer a los conductores información en tiempo real sobre el estado de las carreteras, evitando por ejemplo, los temidos atascos.

La iniciativa del Vehículo Inteligente (Commission's Intelligent Car Initiative) es una respuesta a la necesidad de los ciudadanos, la industria y los Estados miembros para encontrar soluciones comunes a los problemas de movilidad en Europa. A largo plazo, tiene como objetivo avanzar hacia una nueva situación, donde los coches no tengan accidentes y los atascos se reduzcan.

Como hemos comentado anteriormente, la sociedad europea depende en gran medida del transporte. En el siguiente gráfico, podemos observar la importancia del coche en algunos países europeos, como transporte cotidiano en nuestra vida.

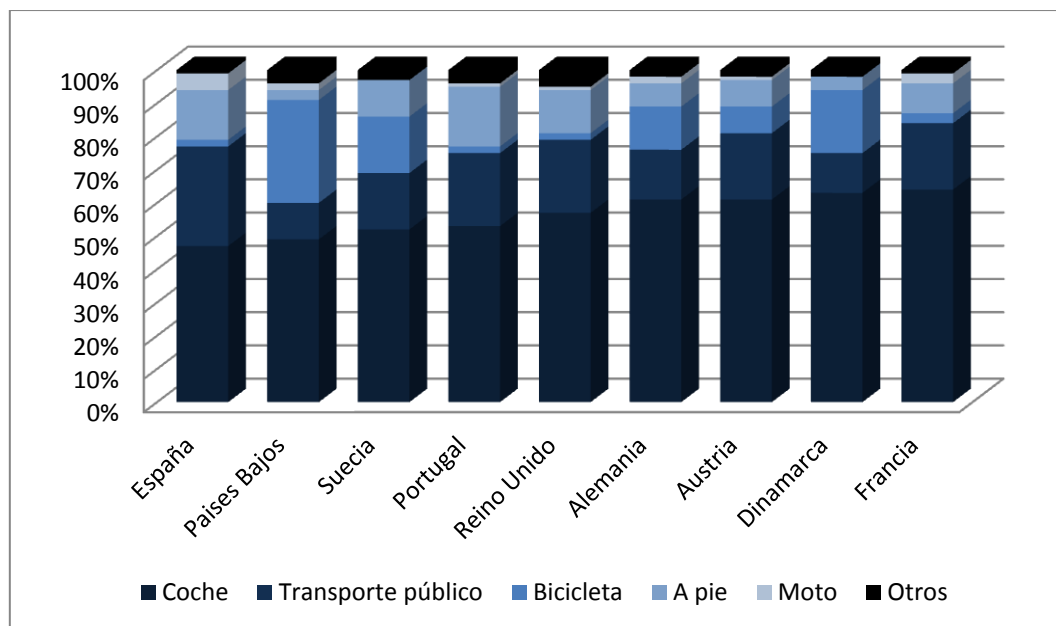
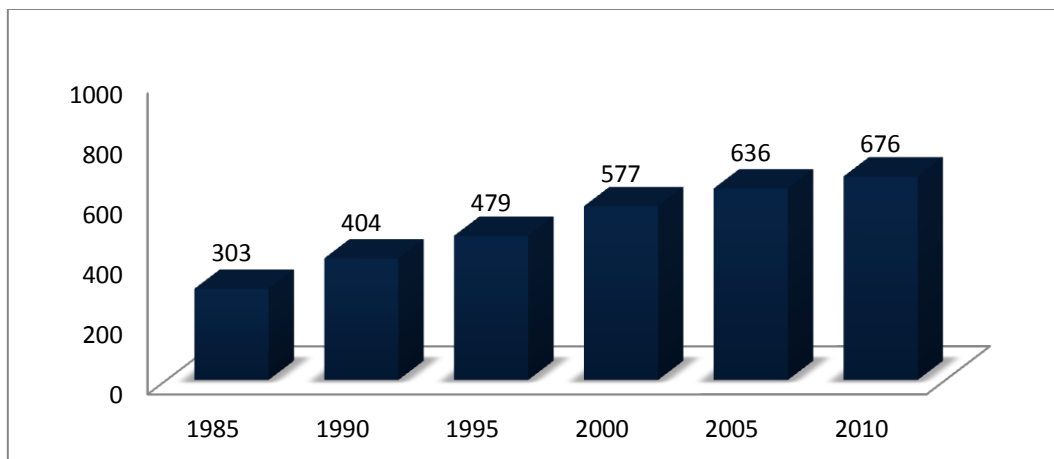


Ilustración 1. Transporte cotidiano en algunos países europeos [Calz].

En el siguiente gráfico, podemos observar el resultado de un estudio de la Oficina Europea de Estadística (Eurostat) en colaboración con la Dirección de Tráfico (DGT), donde se muestra el número de vehículos existentes en España por cada 1000 habitantes, desde el año 1985 hasta el año 2010 [DGTest].



**Ilustración 2. Número de vehículos por cada 1000 habitantes (años 1985-2010) [DGTest].**

En la última década, el volumen de transporte por carretera creció un 35%, lo que causa diariamente atascos de tráfico. Además, en cuanto a la eficiencia energética y las emisiones, el transporte por carretera representa el 85% de las emisiones totales del transporte. Las investigaciones demuestran que hasta un 50% del consumo de combustible es causado por situaciones de congestión vial y el comportamiento no óptimo al volante.

De todos los problemas de transporte, la seguridad es el que tiene el impacto más grave en nuestra vida diaria. Aunque la situación ha mejorado considerablemente, cada año, todavía hay más de 40.000 víctimas mortales en las carreteras de la UE, con cerca de 1,3 millones de accidentes y un coste de alrededor de 200 mil millones de euros por año.

Las investigaciones indican que el error humano está implicado en más del 90% de los accidentes, y en casi tres cuartas partes de los casos el error humano es el único culpable. A modo de ejemplo, un estudio reciente [Intell] llegó a la conclusión de que si tenemos un accidente cuando se conduce a una velocidad de 50 km/h, el frenar con medio segundo de antelación, podría reducir la energía del impacto en un 50%. Sin embargo, un análisis de los accidentes registrados en Alemania mostró que en el 39% de los vehículos de pasajeros y en el 26% de los camiones no se activan adecuadamente los frenos antes de una colisión, y un 40% no frena efectivamente, lo que subraya nuestras limitaciones como conductores.

### 1.1. OBJETIVOS A DESARROLLAR

El objetivo del presente proyecto consiste en la representación del entorno mediante el método conocido como rejillas de ocupación.

Posteriormente una vez representado el entorno y basándonos en los mapas de rejillas de ocupación, nos dispondremos a crear un primer algoritmo para detectar obstáculos en movimiento, representándolos en una ventana gráfica.

Esta aplicación tiene como objetivo en un futuro, integrarse en el Vehículo Inteligente basado en Información Visual (IVVI 2.0), desarrollado por el Laboratorio de Sistemas Inteligentes (LSI) de la Universidad Carlos III de Madrid.



Ilustración 3. Coche inteligente Universidad Carlos III de Madrid.

## **1.2. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO**

El presente documento se desarrolla en nueve capítulos, el primero de los cuales está formado por la presente introducción, donde se introducen también los objetivos.

En el capítulo 2 se desarrolla el estado del arte. Dicho capítulo, introduce los coches inteligentes y los sistemas de ayuda a la conducción existentes, para continuar con la percepción del entorno y los métodos existentes para la construcción de mapas.

El capítulo 3 describe la arquitectura hardware empleada en el presente proyecto, mencionando con especial detalle el telémetro láser.

En el capítulo 4, se detalla la arquitectura software utilizada. En este capítulo, se incluye las librerías usadas en el proyecto, incluyendo también la comunicación con el telémetro láser.

El capítulo 5, aborda la implementación del proyecto, explicando el código de desarrollo mediante flujogramas.

El capítulo 6, muestra los resultados obtenidos.

En el capítulo 7, se detalla el presupuesto del proyecto.

Y por último, el capítulo 8, comenta las conclusiones y trabajos futuros.

# **Capítulo 2.**

## **Estado del arte**

## 2. ESTADO DEL ARTE

### 2.1. COCHES INTELIGENTES

Los coches inteligentes son producto de los avances tecnológicos, ya que cuentan con las principales características de un magnífico copiloto. Su finalidad es ayudar al conductor, vigilar por su seguridad y mantenerle informado avisando de posibles situaciones de riesgo. La mejora y el desarrollo de nuevos elementos de asistencia a la conducción pueden revolucionar la seguridad activa de los vehículos. Esta serie de innovaciones pretenden reducir la siniestralidad y evitar los accidentes, lo que contribuirá a salvar vidas en carretera.



Ilustración 4. Coche inteligente de Google.

La mayoría de los fabricantes ya están integrando en sus modelos algunos de estos sofisticados dispositivos de seguridad. Así, conducir este tipo de vehículos resulta mucho más fácil, aunque no por ello el conductor debe confiarse demasiado y distraer su atención. Un coche inteligente ayuda, pero nunca hasta el punto de suprimir totalmente la voluntad del conductor. La persona será siempre la que mantenga el control sobre el vehículo y no al contrario [Consu].

Los dispositivos instalados en este tipo de coches se pueden clasificar en dos grandes sistemas: los sistemas de ayuda a la conducción y los sistemas cooperativos para la seguridad en carretera [EcEuro]. A continuación, detallaremos cada uno de ellos.

## 2.2. SISTEMAS DE AYUDA A LA CONDUCCIÓN

Los sistemas de ayuda a la conducción integrados en el vehículo ayudan a los conductores a evitar o a mitigar un accidente, detectando la naturaleza e importancia del peligro.

Dependiendo de la importancia de la amenaza, estos sistemas de seguridad a bordo:

- Alertan al conductor lo antes posible de un peligro inminente
- Avisan al conductor si no hay reacción por su parte a la primera alerta y
- Asisten de forma activa o, en última instancia, intervienen para prevenir el accidente o mitigar sus consecuencias.

Los sistemas preventivos de seguridad también ayudan a los conductores a:

- Mantener una velocidad segura
- Mantener la distancia de seguridad con otros vehículos
- Conducir sin salirse del carril
- Evitar los adelantamientos peligrosos
- Atravesar los cruces con seguridad
- Evitar los atropellamientos de usuarios vulnerables de la vía pública
- Y, como último recurso, reducir la gravedad de un accidente si, a pesar de todo, llegara a ocurrir.

Las tecnologías relacionadas con los sistemas de ayuda a la conducción son las siguientes:

### Sistema antibloqueo de frenos (ABS)

El sistema antibloqueo de frenos evita que se bloqueen las ruedas modulando automáticamente la presión sobre los frenos cuando el conductor pisa el pedal a fondo. En suelos resbaladizos, en los que la fricción entre la superficie de la carretera y el neumático es baja, las ruedas se bloquean fácilmente, lo que hace imposible controlar el vehículo. Al evitar que se bloqueen las ruedas, el sistema permite al conductor mantener el control de la dirección y detenerse en la menor distancia posible en la mayoría de las situaciones. El sistema detecta una desaceleración brusca del giro de cada rueda y reduce la presión en ese freno hasta que vuelve a detectar una aceleración. Lo hace muy deprisa, antes de que la rueda pueda cambiar de velocidad de forma apreciable. El resultado es que la rueda pierde velocidad al mismo ritmo que el vehículo y los frenos mantienen las ruedas muy cerca del punto en el que empiezan a bloquearse. Este proceso dota al sistema de la máxima potencia de frenado. El ABS se usó por primera vez en coches en 1970 y en la actualidad todos los coches nuevos disponen de ello.

### Sistema electrónico de asistencia a la frenada (EBS)

El sistema electrónico de asistencia a la frenada es una ayuda muy eficaz cuando el conductor quiere detener el vehículo lo antes posible. En estas situaciones, la mayoría de los conductores pisa el freno con rapidez, pero no con la máxima presión, lo que alarga peligrosamente las distancias de frenado. El sistema se activa cuando el asistente a la frenada nota que el conductor frena de forma rápida y brusca, lo que suele considerarse una “frenada de emergencia”, y de inmediato aplica la potencia de frenado máxima. Así, aun pisando el pedal a presión moderada se produce una desaceleración máxima. Esto puede ayudar a evitar un accidente o reducir su gravedad, al limitar la velocidad del vehículo en el momento de la colisión.

### Detección de ángulo muerto / Asistente de cambio de carril

El sistema de detección de objetos en el ángulo muerto y el asistente de cambio de carril vigilan constantemente los puntos traseros sin visibilidad a ambos lados del vehículo. Por ejemplo, antes de adelantar o cambiar de carril, el conductor mira por el retrovisor exterior y confirma que no hay nadie en el carril al que pretende cambiar; pero de repente entra un coche, justo cuando el conductor está a punto de hacer la maniobra. Estas situaciones críticas suceden a menudo en el tráfico urbano y acaban en accidente si no se ve el vehículo situado en el ángulo muerto. Cuando el intermitente está activado para señalar que el conductor está a punto de cambiar de carril, estos sistemas avisan visualmente o con una suave vibración del volante en caso de peligro.



**Ilustración 5. Detección de ángulo muerto.**

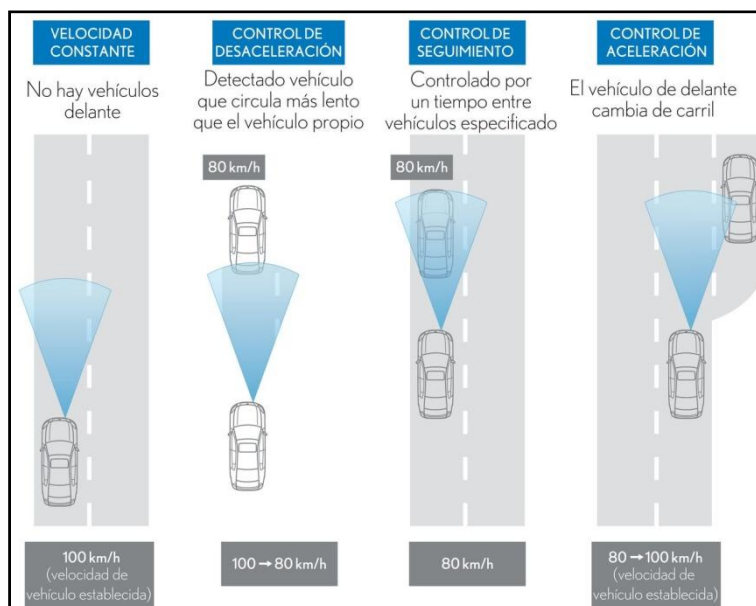


### Luces autoadaptables

Las luces autoadaptables orientan el haz luminoso a la izquierda, a la derecha, hacia arriba o hacia abajo según el ángulo de dirección de las ruedas, la velocidad y el movimiento del vehículo. Así se mantiene la carretera correctamente iluminada cuando la delantera del vehículo baja debido a una fuerte desaceleración; se evita que el haz se eleve cuando el vehículo acelera y, además, la luz se mantiene en la calzada, y no a un lado, al tomar curvas.

### Control de cruceo adaptativo (ACC)

La tecnología de control de cruceo adaptativo mejora la función de control de cruceo normal ajustando automáticamente la distancia y la velocidad en función de la marcha del vehículo que le precede. Esto se consigue con un detector de radar de gran alcance, un procesador de señales y un control longitudinal del vehículo. Si el vehículo que va delante reduce la velocidad o se detecta otro objeto, el ACC ajusta la velocidad del vehículo sin intervención del conductor. Cuando se haya despejado la carretera, el sistema volverá a acelerar el vehículo hasta la velocidad programada. Al igual que ocurre con el control de cruceo normal, el conductor puede desactivar el sistema cuando lo desee.



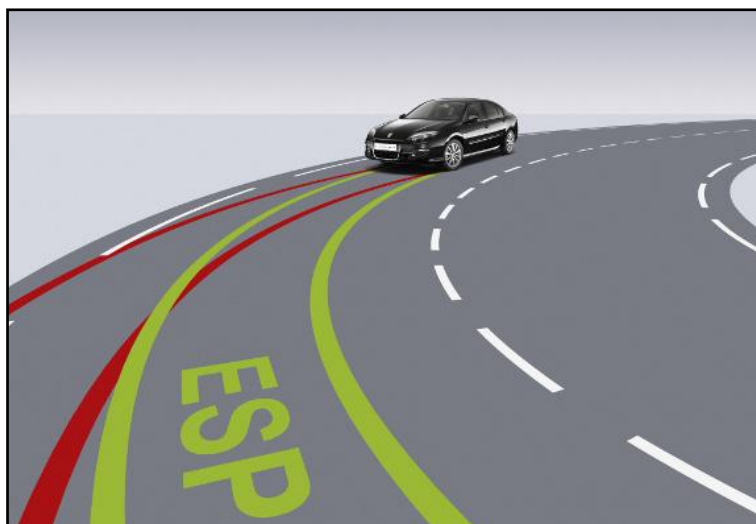
**Ilustración 6. Funcionamiento de Control de Cruceo Adaptativo.**

### Sistemas de control y alerta de la somnolencia

Los sistemas de control y alerta de la somnolencia pueden detectar la somnolencia del conductor de varias formas: atendiendo a la expresión facial y los movimientos de manos y pies o analizando el parpadeo y la posición de la cabeza, o incluso las alteraciones del ritmo cardiaco. Esta información o combinación de varios factores, se analiza constantemente y el conductor recibe una alerta en caso de somnolencia o distracción.

### Control electrónico de estabilidad (ESP)

Muchos accidentes se deben, al menos en parte, a que el conductor pierde el control del vehículo. Esto puede obedecer a muchas causas: valoración incorrecta por parte del conductor (por ejemplo, velocidad excesiva al girar o tomar una curva), maniobras bruscas para evitar peligros o superficies resbaladizas. En esas circunstancias el vehículo excede a menudo los límites de tracción de los neumáticos sobre la carretera y el coche derrapa. O bien no puede girar a velocidad suficiente (subviraje), o bien gira a velocidad excesiva, lo que da lugar a un trompo (sobreviraje). Una vez que el conductor ha perdido el control, es muy difícil maniobrar el vehículo de forma segura, lo que suele provocar un accidente. Evitar la pérdida de control o corregirla cuanto antes puede ayudar a evitar un accidente. El control electrónico de estabilidad detecta la desviación de la trayectoria del vehículo con respecto a la dirección que se desea llevar. Sin que el conductor tenga que hacer nada, el sistema frena ligeramente cada rueda por separado y así devuelve el vehículo a la trayectoria deseada. El conductor mantiene el control del vehículo y, a menudo, ni se da cuenta de que ha intervenido el sistema de control de estabilidad.



**Ilustración 7. Trazada correcta con ESP.**

### Sistema de aviso de cambio involuntario de carril (LDWS)

Los sistemas de aviso de cambio involuntario de carril vigilan la posición del vehículo dentro del carril y avisan al conductor si se sale o está a punto de salirse. Los LDWS comercializados actualmente son sistemas avanzados, basados en la visión, que usan algoritmos para interpretar imágenes de vídeo y calcular la posición del vehículo (posición lateral, velocidad lateral, rumbo, etc.) y la alineación de la calzada (anchura del carril, curvatura de la carretera, etc.). El LDWS avisa al conductor del cambio de carril cuando el vehículo supera una determinada velocidad y no está activado el intermitente. Además, el LDWS informa al conductor en caso de no poder detectar los carriles o mal funcionamiento del sistema.

### Sistemas de visión nocturna

Un número considerable de accidentes de carretera se produce de noche. Con las luces de cruce normales, de noche la visibilidad para el conductor se reduce a unos 40 metros y la percepción de la profundidad y el color disminuye, lo que lleva a detectar los obstáculos y peligros demasiado tarde. Las luces largas deslumbran a los coches que vienen de frente, y por ello su utilidad es limitada. Un sistema de visión nocturna ofrece mejor visibilidad por la noche gracias a unos sensores de infrarrojos próximos o lejanos cuyo alcance es equivalente al de las luces largas. El sistema no deslumbra al tráfico de frente, ya que los infrarrojos son invisibles para el ojo humano. La escena iluminada se muestra al conductor en una pantalla especial que ofrece una mejor visión de la carretera, incluidos otros vehículos y obstáculos distantes. Por consiguiente, el conductor puede detectar situaciones peligrosas con mayor antelación y reaccionar con mayor rapidez.



**Ilustración 8. Sistema de visión nocturna.**

### Sistema de protección de peatones y usuarios vulnerables de la vía pública

Son sistemas que ayudan a evitar colisiones y protegen a los usuarios vulnerables de la vía pública, tales como los peatones y los ciclistas. Una serie de sistemas de sensores (a menudo de varios tipos) vigilan la zona situada por delante del vehículo, detectan de forma fiable a los usuarios vulnerables y los distinguen de otros obstáculos. El sistema utiliza diferentes accionadores, como el frenado autónomo o el asistente a la frenada, que ayudan a evitar las colisiones o mitigan sustancialmente sus consecuencias al reducir la velocidad del vehículo antes del impacto. Si no se puede evitar la colisión, se activan los accionadores de protección estructural (por ejemplo, airbags en el parachoques, elevación del capó del coche, etc.), que limitan el riesgo de lesiones graves o incluso salvan las vidas de los usuarios vulnerables.

#### Indicador de cambio de marcha (GSI)

El indicador de cambio de marcha favorece un estilo de conducción conservador al ayudar a ahorrar combustible y a conducir de forma más suave y económica. Su función es avisar visualmente del momento en que debe cambiarse de marcha. El sistema de gestión del motor facilita toda la información que necesita el GSI. Se trata de un dispositivo sencillo que recuerda a los conductores de vehículos con cambio manual cuándo deben cambiar a una marcha más larga o más corta.

#### Sistema de control de presión de neumáticos (TPMS)

El sistema de control de presión de neumáticos es un dispositivo electrónico que vigila la presión del aire en el interior del neumático, informando en tiempo real al conductor del vehículo. Un sistema TPMS mejora la seguridad del vehículo, ayuda a los conductores a mantener los neumáticos en buen estado y reduce las emisiones a la atmósfera.

### **2.3. SISTEMAS COOPERATIVOS PARA LA SEGURIDAD EN CARRETERA**

Los sistemas individuales de asistencia al conductor pueden tener efectos positivos en la seguridad y en la gestión del tráfico. Pero estos beneficios podrían aumentar notablemente si los vehículos fueran capaces de comunicarse entre ellos o con la infraestructura vial.

En los últimos años, el énfasis en la investigación del vehículo inteligente se ha dirigido hacia los sistemas cooperativos en los que los vehículos se comunican entre ellos y/o con la infraestructura. Estos sistemas cooperativos pueden incrementar notablemente la calidad y la fiabilidad de la información disponible sobre los vehículos, su localización y sobre la carretera. Ellos permiten nuevos y mejorados servicios para los usuarios que, a la larga, conllevará:

- Mayor eficacia del transporte, haciendo un mejor uso de la capacidad de la infraestructura disponible y manejando las diversas necesidades;
- Mayor seguridad, mejorando la calidad y la fiabilidad de la información y permitiendo la puesta en práctica de los sistemas avanzados para la seguridad.

Las tecnologías relacionadas con los sistemas cooperativos para la seguridad en carretera son las siguientes:

### Sistema de aviso de obstáculos o colisión

Los sistemas de aviso de obstáculos o colisión ayudan al conductor a evitar o mitigar los accidentes al detectar vehículos u otros obstáculos en la carretera y avisar de colisión inminentes. Las soluciones actuales, de funcionamiento limitado, son una función complementaria del control de crucero adaptativo, que utilizan información obtenida por los detectores de radar para generar avisos acústicos y visuales. Los sistemas del futuro utilizarán detectores de radar de largo y corto alcance, sistemas LIDAR y procesamiento de imágenes de vídeo o una combinación de todos estos dispositivos. Además de avisar al conductor, el sistema puede preparar el circuito de frenos para que actúen de inmediato a máxima potencia (asistente a la frenada) cuando el conductor accione el pedal o preparar los airbags y tensar los cinturones de seguridad para una colisión inminente.

### Sistema paneuropeo de llamada de emergencia en el vehículo: eCall

Cuando se produce un accidente de carretera, la rapidez con la que se movilicen los servicios de urgencia es de importancia decisiva para salvar vidas o reducir las consecuencias de las lesiones. En caso de urgencia, o incluso de colisión, el sistema eCall puede reducir de forma espectacular el tiempo de respuesta de los servicios de emergencia. El sistema eCall puede ser activado manualmente por los ocupantes del vehículo, o bien automáticamente en caso de accidente grave gracias a sensores instalados en el vehículo. El sistema eCall instalado en el vehículo establecerá una conexión de voz a través del número 112 con el correspondiente centro público de atención de llamadas de urgencia, enviando datos vitales, como la hora y lugar del accidente y las características del vehículo afectado.

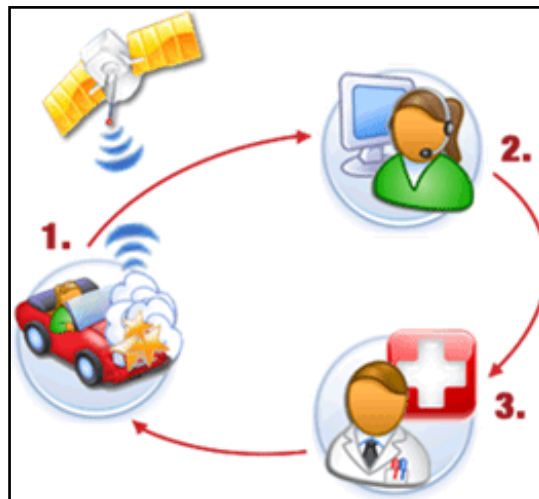


Ilustración 9. Funcionamiento del sistema e-Call.

### Aviso de peligro local

Los avisos de peligro local se usan para mayor seguridad y fluidez del tráfico en caso de alteraciones debidas a accidentes, embotellamientos o condiciones climatológicas adversas. Los sistemas se manejan de forma automática, semiautomática o manual, desde centros de control de tráfico basados en sistemas de control fijos o en sensores móviles (FCD, etc.) instalados sobre el terreno. Para facilitar información a los conductores se utilizan paneles de señalización variable (VMS). Se distinguen tres tipos de VMS en función de los mensajes transmitidos: mensajes obligatorios, mensajes de aviso de peligro y mensajes informativos. Los sistemas dinámicos de gestión del tráfico suelen transmitir mensajes obligatorios, a veces acompañados de mensajes de aviso de peligro e informativos, y los sistemas de aviso local transmiten mensajes de aviso de peligro.

### Asistente de cruces

Los accidentes en cruces se producen cuando los conductores realizan maniobras inadecuadas, no prevén las acciones de los demás conductores o no respetan las señales de tráfico. El asistente de cruces puede reducir el riesgo mediante dispositivos como los siguientes:

- Aviso de preferencia: indica al conductor que ceda el paso a la derecha. En la pantalla instalada en el vehículo aparecen tres niveles de peligro: verde, amarillo y rojo. Si el conductor no reacciona correctamente a la información visual, una señal acústica le avisa de una colisión inminente.
- Asistente para semáforos: el semáforo transmite la información al vehículo por vía inalámbrica. La aplicación de seguridad instalada en el vehículo indica la luz del semáforo y sugiere al conductor la velocidad que debe mantener para poder cruzarlo en verde.



**Ilustración 10. Asistente de cruces.**

### Alerta de velocidad

El sistema avisa al conductor con una alarma acústica, visual o táctil cuando la velocidad excede el límite local legalmente establecido. La información sobre el límite de velocidad se recibe a través de unos transpondedores instalados en las señales de limitación de velocidad o a partir de un mapa digital de carreteras, que para funcionar requiere información posicional fiable.

### Gestión dinámica del tráfico

Gracias a los paneles de señalización variable (VMS) puede influirse en el tráfico controlando la velocidad, el uso de los carriles, la elección de itinerarios y las operaciones de confluencia de vehículos para así mejorar la seguridad y la explotación de la red viaria. Existen tres tipos de VMS: mensajes obligatorios, mensajes de aviso de peligro y mensajes informativos.

### Aviso inalámbrico de peligro local

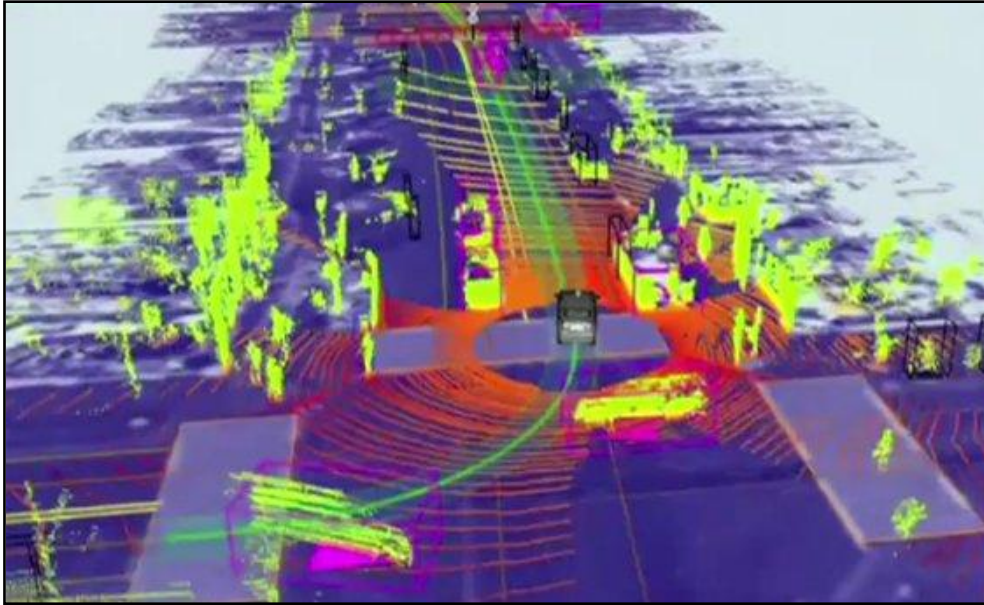
Ser previsores y anticiparse a los peligros es clave para una conducir con seguridad y evitar accidentes. El aviso inalámbrico de peligro local es un sistema de comunicación que amplía el horizonte del conductor y le avisa de forma inteligente de situaciones de peligro en carretera. La aplicación permite a los conductores adaptar rápidamente la velocidad del vehículo y la distancia de seguridad, lo que permite tener mayor consciencia de posibles situaciones de peligro. El aviso inalámbrico de peligro local:

- detecta y alerta de obstáculos en carretera y advierte en caso de que el coche propio sea un obstáculo para los demás;
- alerta de la presencia de vehículos de emergencia o vehículos lentos;
- detecta una menor adherencia o visibilidad a consecuencia del mal tiempo;
- se conecta con balizas electrónicas de señalización de obras u otras zonas de peligro.

## **2.4. CONSTRUCCIÓN DE MAPAS**

La percepción de un entorno desconocido es uno de los principales desafíos de los sistemas móviles y los sistemas de asistencia al conductor. Aquí el conocimiento sobre el entorno es un elemento obligatorio y esencial para evitar colisiones.





**Ilustración 11.** Percepción del entorno del coche autónomo de Google.

Para representar dicho entorno, existen diversas formas de representación. Una primera clasificación de los tipos de mapas existentes se centra en el ámbito que abarcan. Así, pueden ser clasificados como globales (cuando representan el entorno completo, normalmente mediante el empleo de la información existente sobre el mismo) o como locales (cuando muestran el entorno próximo al móvil, construido a partir de las medidas proporcionadas por los sensores en tiempo de ejecución) [Mora09].

Una división posterior de los tipos de mapas a nivel de representación de la información son: los mapas métricos y los topológicos. A continuación detallamos dichos tipos.

#### **2.4.1. MAPAS MÉTRICOS**

Los mapas métricos representan el espacio libre y/o obstáculos directamente mediante una discretización del entorno.

Se pueden clasificar en dos tipos: mapas basados en rejillas de ocupación y mapas geométricos.



#### 2.4.1.1. MAPAS BASADOS EN REJILLAS DE OCUPACIÓN

Los mapas basados en rejillas de ocupación dividen el entorno en una serie de celdas uniformes, pudiendo ser representado en dos dimensiones o tres dimensiones. Cada celda contiene un valor de probabilidad, que nos indica si está ocupada por un obstáculo, está libre o no ha sido explorada por el momento [Elfes89]. Es posible además, utilizar rejillas de ocupación definidas por el usuario, pero lo usual es que sea el propio robot móvil el que realice la construcción de la rejilla de forma autónoma, mediante algún algoritmo de exploración. En la ilustración 12 se muestra un ejemplo de rejilla de ocupación.

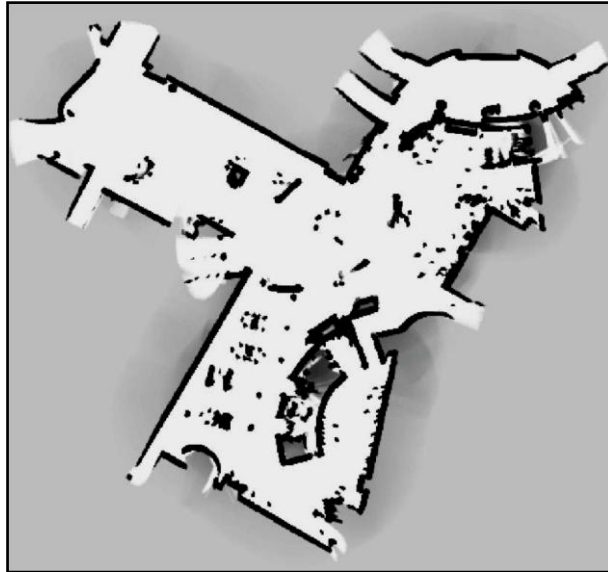


Ilustración 12. Ejemplo de rejilla de ocupación [Thrun].

Este método fue introducido inicialmente por Moravec y Elfes [MorElf] en el año 1985 creando un marco probabilístico. Tres años más tarde, Elfes y Matthies [ElfMat] se centraron en un enfoque bayesiano. Posteriormente, en 1997, Konolige [Kono] aumentó dicho enfoque bayesiano. Y por último, Thrun [Thrun01], en 2001, dio un enfoque basado en el mapeado de ocupación máxima a posteriori [Occup]. La base teórica de las rejillas de ocupación podemos encontrarla en el anexo I.

La mayor ventaja de este tipo de mapas es que son fáciles de construir y de mantener, incluso en entornos de gran envergadura. Por otro lado, puesto que la geometría de las celdas se corresponde con la geometría del terreno, es fácil para un robot determinar su posición dentro del mapa tan sólo conociendo su posición y orientación en el mundo real. Este tipo de representación facilita el cómputo de la trayectoria más corta.

Sin embargo sufre de un problema básico, la gran cantidad de memoria necesaria para el almacenamiento de la información, así como la complejidad temporal de los algoritmos necesarios para la extracción de información elaborada, como por ejemplo la determinación de trayectorias. Esto es debido a que la resolución del mapa, debe ser lo suficientemente fina

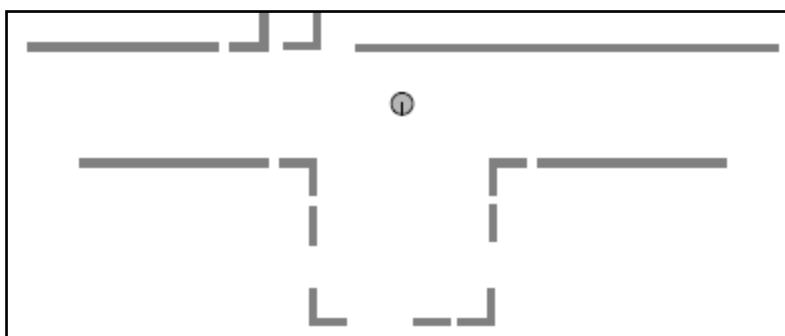
para capturar información importante del entorno. Tampoco facilita la creación de interfaces para la introducción de órdenes [Martín].

Las rejillas de ocupación se han utilizado en numerosos enfoques de localización, normalmente para alinear mapas locales contruidos mediante los datos de los sensores con el mapa de ocupación global. En los últimos años ha resurgido el interés en las rejillas de ocupación al aparecer algoritmos que permiten manejar el problema de los errores de odometría en la construcción de rejillas de entornos de gran tamaño [Gallar99].

#### 2.4.1.2. MAPAS GEOMÉTRICOS

Los modelos geométricos definen el entorno mediante sus características geométricas (distancias, dimensiones de los elementos que lo componen, posiciones absolutas). La ventaja principal de estos modelos es que, si se utilizan junto con un buen modelo de sensor, es posible simular los datos que los sensores del robot obtendrían en cualquier posición del entorno. Esto hace posible comparar los datos percibidos por el robot con los datos que se obtendrían en posiciones candidatas, calculándose una actualización de la probabilidad asociada a cada posición.

Existen distintos tipos de modelos geométricos. Un primer enfoque define el entorno mediante un conjunto de características geométricas (segmentos de rectas, esquinas) y mediante las relaciones geométricas entre ellas (distancia, posición, etc.). Otro enfoque, los modelos geométricos basados en características, se relacionan directamente con implementaciones de modelos de sensor en las que se utilizan estas características geométricas como elementos base del modelado. En la ilustración 13 se muestra un ejemplo de mapa del entorno construido a base de las características geométricas definidas: esquinas, aristas y segmentos de rectas [Gallar99].



**Ilustración 13.** Ejemplo de modelo geométrico del entorno [Gallar99].

### 2.4.2. MAPAS TOPOLÓGICOS

La idea central de los mapas topológicos es representar las características esenciales del entorno percibidas por el robot móvil utilizando un grafo como modelo de alto nivel. Se pueden considerar como grafo, los nodos y los arcos.

Los nodos se utilizan para representar lugares del entorno indicando la viabilidad de navegación entre una situación y otra contigua. Por su parte, los arcos son caminos entre los lugares. Dichos lugares constituyen zonas del entorno (*landmarks*) con características sensoriales distinguibles de forma absoluta, o respecto a sus nodos vecinos. Los nodos corresponden a la unidad elemental de localización, de manera que toda una zona geométrica del mapa real se representa por un único lugar. A partir del mapa topológico no es posible distinguir localizaciones más finas que las representadas por los lugares. Veamos, como ejemplo, la ilustración 14 que muestra la propuesta de mapas topológicos de Kuipers.

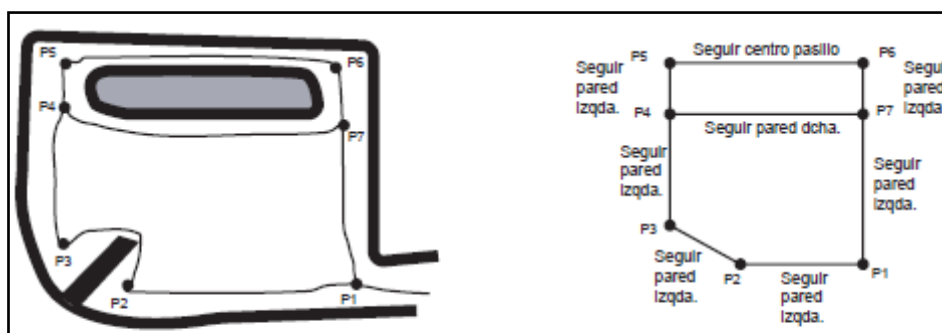


Ilustración 14. Ejemplo de mapa topológico de Kuipers [Gallar99].

Los nodos corresponden a puntos distintivos del entorno y los arcos a caminos recorridos por el robot. Una posición del entorno correspondiente a un nodo debe distinguirse localmente de su vecindad mediante algún criterio definible en términos de los datos sensoriales. Los arcos entre los nodos representan caminos que se han seguido para llegar de un nodo a otro utilizando una determinada estrategia de control local (*seguir centro pasillo*, *seguir pared derecha* o *seguir pared izquierda*).

La utilidad de este tipo de mapas consiste en la facilidad que ofrecen en cuanto a la planificación de trayectorias para la navegación de un robot y la baja complejidad espacial que requieren, ya que la resolución depende de la complejidad del entorno. No necesita conocer la situación geométrica exacta del robot, y se trata de la representación más conveniente para algoritmos de solución de problemas, o planificadores basados en información simbólica, y proporcionan interfaces para la introducción de órdenes más cercanos al lenguaje natural, como por ejemplo, “ve a la habitación A”. Pero es más difícil su construcción y mantenimiento en el caso de grandes entornos. El reconocimiento de lugares frecuentemente ofrece ambigüedad, ya que depende del punto de vista del robot que recoge la situación. Los planificadores pueden ofrecer en ocasiones trayectorias subóptimas [Gallar99].

# **Capítulo 3.**

# **Arquitectura**

# **hardware**

### 3. ARQUITECTURA HARDWARE

En el presente capítulo, se abordará la arquitectura hardware usada en el proyecto.

En la siguiente ilustración, se muestran los distintos componentes hardware del sistema, mediante un gráfico explicativo.

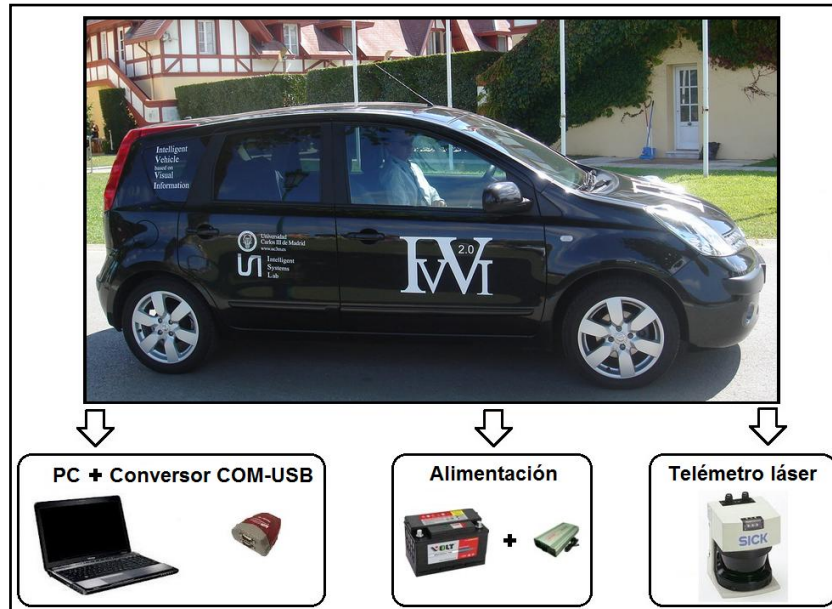


Ilustración 15. Esquema de la arquitectura hardware empleada.

#### 3.1. TELÉMETRO LÁSER SICK LMS291-S05

El telémetro láser usado en el proyecto, es el modelo SICK LMS 291-S05, capaz de leer un plano de 2 dimensiones con una resolución desde  $1^\circ$  hasta  $0.25^\circ$ , y con un campo de visión configurable hasta  $180^\circ$ . La distancia máxima es regulable desde los 8m hasta los 80m. El periodo mínimo de muestreo del láser es de 13ms (Hoja de características: ver anexo III) [SICK] [Gar09].



Ilustración 16. Telémetro láser SICK LMS 291.

### 3.1.1. FUNCIONAMIENTO

El funcionamiento de dicho telémetro láser se basa en la tecnología LIDAR (*Light Detection and Ranging* o *Laser Imaging Detection and Ranging*), permitiendo determinar la distancia desde un emisor láser a un objeto o superficie utilizando un haz láser pulsado.

El tipo de escaneado es lineal, ya que el telémetro dispone de un espejo rotatorio en un sólo sentido que va desviando el haz láser, produciendo líneas paralelas en el terreno como patrón de escaneado. El inconveniente principal de este sistema es que al girar el espejo en una sola dirección no siempre tenemos mediciones.

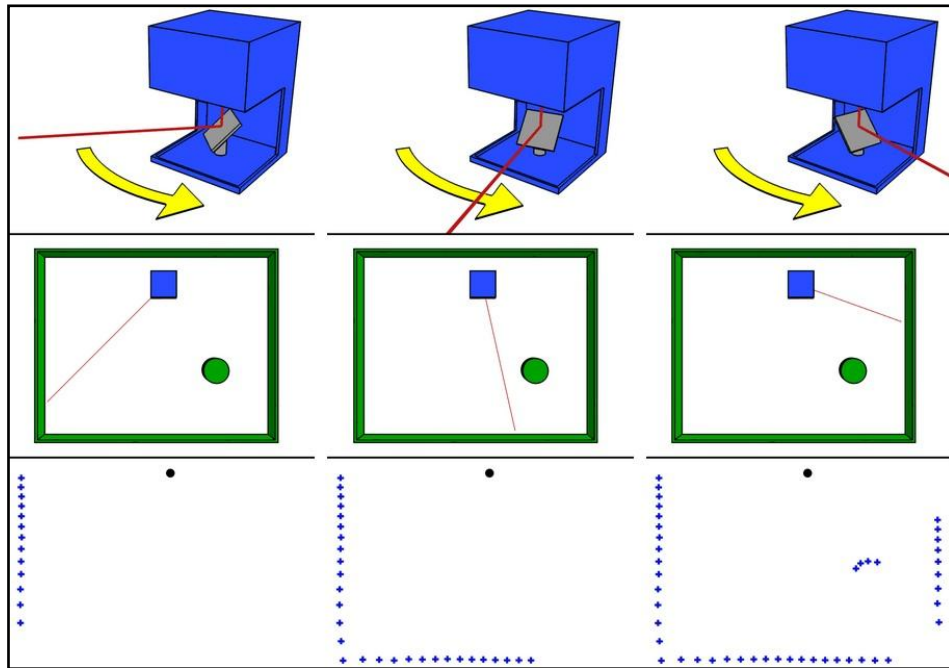


Ilustración 17. Secuencia de funcionamiento del espejo interno del láser [LIDAR].

La secuencia completa de funcionamiento la podemos ver en [LIDARgif].

Gracias al uso del espejo interno giratorio que refleja internamente el haz de luz del láser, podemos realizar barridos de 180°, como se muestra en la siguiente ilustración.

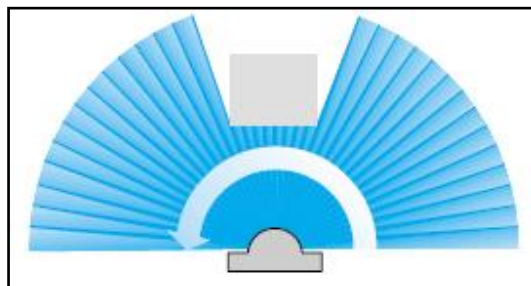


Ilustración 18. Barrido (180°) del láser.

Para la aplicación desarrollada se ha empleado la configuración a  $0,25^\circ$  de resolución y una distancia de 80m, con un ángulo de visión de  $100^\circ$ .

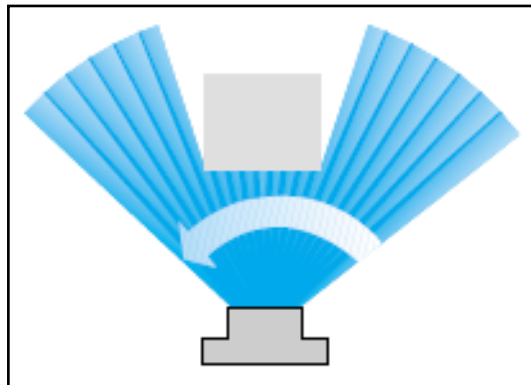


Ilustración 19. Barrido ( $100^\circ$ ) del láser.

Para lograr la resolución deseada, el láser realiza cuatro escaneos independientes de un grado cada uno de resolución, cada uno de ellos separado  $0,25^\circ$  con respecto a los demás. De esta forma es posible conseguir una resolución de  $0,25^\circ$  al cuarto escaneo.

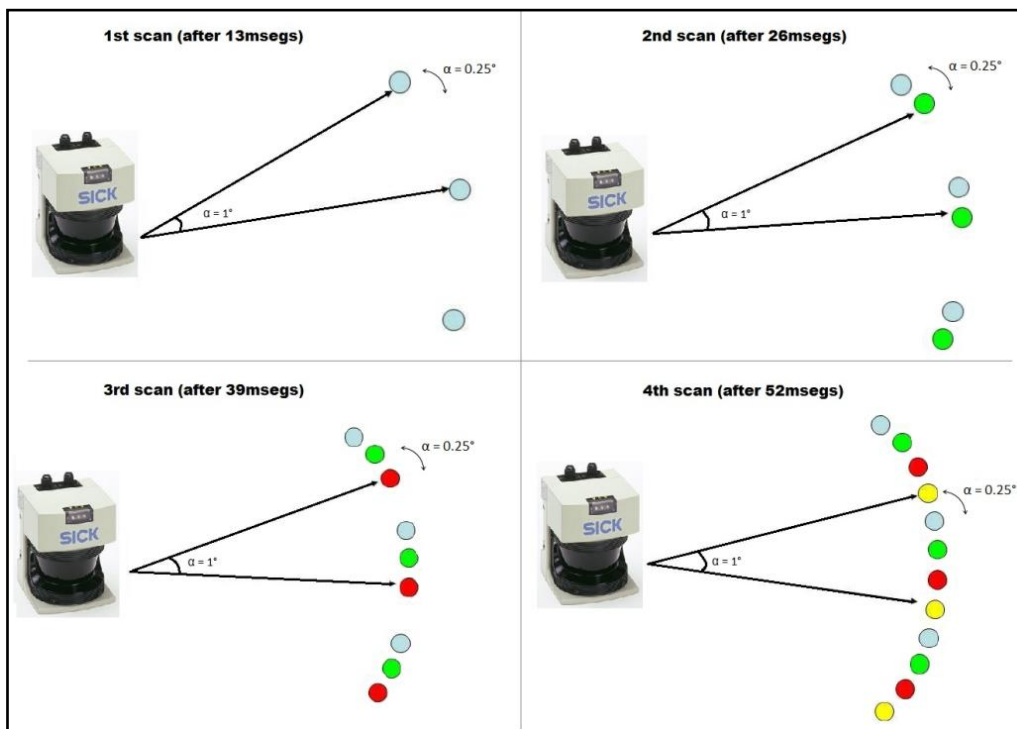


Ilustración 20. Comportamiento del láser para un escaneo simple de resolución  $0,25^\circ$ .

El proceso para la medición de la distancia entre el sensor y el entorno se lleva a cabo mediante la medición del tiempo de vuelo que tarda un pulso desde que es emitido hasta que es recibido. Considerando  $v$  la velocidad de la onda propagada en el medio y  $\Delta t$  el tiempo transcurrido entre la emisión y recepción del rayo [Caste02], la distancia  $d$  entre el telémetro láser y los obstáculos, puede ser calculada mediante la siguiente fórmula:

$$2 \cdot d = v \cdot \Delta t$$

### 3.1.2. VENTAJAS E INCONVENIENTES DEL TELÉMETRO LÁSER

La gran ventaja de un captador basado en datos de telemetría es su poca dependencia de las condiciones de iluminación de la escena, y que obtiene las coordenadas de los puntos sin necesidad de hacer un cálculo previo. Además, debido a su excelente orientación, se obtienen datos muy exactos para un gran rango de distancias. Otra gran ventaja es la de no tener (o tener pocos) lóbulos laterales (comparado con otros sensores como pueden ser los ultrasonidos), esto hace que el haz láser no pierda intensidad en otras direcciones, permitiendo medir distancias mucho mayores.

Como desventajas de este sensor puede decirse que, al ser un sensor activo, consume mucha más energía que un captador pasivo basado en imágenes estereoscópicas y que la obtención de medidas correctas dependerá del tipo de superficie que estemos detectando y de las condiciones atmosféricas. Presentará problemas de detección en superficies de materiales reflectantes según el ángulo de incidencia, o en superficies de materiales muy absorbentes.

Además, presenta cierta sensibilidad a las condiciones del entorno como niebla o polvo. En los últimos años se han introducido técnicas de “medida del último pulso” para resolver este problema de sensibilidad. El concepto básico consiste en detectar el último eco recibido de un pulso o de un tren de pulsos. El eco de la superficie del objeto que deseamos detectar es el que está más lejos y el que se usará para el cálculo. Cuando operamos en entornos hostiles tales como niebla, polvo o humo, esta técnica garantiza que la distancia medida de retorno es la de la superficie en lugar de la producida por la dispersión del medio [Caste02].

### 3.1.3. APLICACIONES

Los láseres de barrido son un elemento indispensable en numerosos campos de la robótica, facilitando, simplificando y aportando seguridad en diferentes tareas, tanto industriales como cotidianas.

Algunas de las aplicaciones de un láser de barrido 2D en exteriores son las siguientes:



- Adquisición de información de tráfico: el sistema de medida láser integrado en un sistema de adquisición del flujo de tráfico puede detectar la presencia, geometría, velocidad y comportamiento de los usuarios de una vía.
- Vigilancia de áreas abiertas: el láser detecta con fiabilidad objetos o personas en un área abierta, independientemente de condiciones meteorológicas, hora del día o acabado de la superficie.
- Detección de obstáculos en transporte subterráneo: el láser revela objetos móviles o estáticos en el entorno. Es independiente de la luz, lo que permite su uso en cualquier tipo de medio.
- Monitorización de rutas y control en vehículos autónomos: el láser controla las distancias mínimas y ofrece confianza a la hora de detectar obstáculos en diferentes entornos.
- Detección de dimensión de contenedores: los láseres pueden calcular las dimensiones de diferentes objetos con el fin de poderlos manipular correctamente, sin dar lugar a accidentes.
- Adquisición de perfiles 3D de material a granel: el láser mide la pila de material, posteriormente los datos medidos se convertirán en información de posición para controlar la maquinaria que mueve el material.
- Clasificado de vehículos: el láser clasifica los vehículos, calculando sus volúmenes pudiendo evitar así fraudes en aduanas y peajes de autopistas.
- Prevención de colisiones: el láser detecta los obstáculos permitiendo al vehículo reaccionar ante ellos.
- Conducción autónoma de vehículos: el láser determina la posición y distancia de los obstáculos, pudiendo desarrollar a partir de esta información un método fiable para la conducción no tripulada de vehículos.

### 3.1.4. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

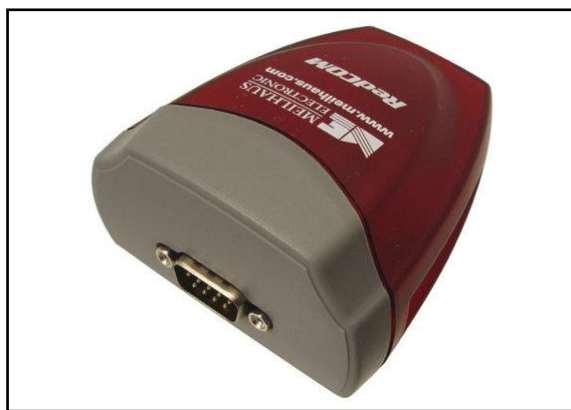
	<b>LMS 291</b>	<b>Technical Specifications</b>
<b>General</b>		
Range		Maximum 80 m (262.5 ft)
Angular Resolution		0.25°/0.5°/1.0° (selectable)
Response Time		53 ms/26 ms/13 ms
Measurement Resolution		10 mm (0.39 in)
System Error (environmental conditions: good visibility, Ta = 23°C (73°F), reflectivity 10%...10,000%)		Typ. ± 60 mm (mm-mode), range 1...4 m (3.2...13.1 ft) Typ. ± 35 mm (mm-mode), range 4...20 m (13.1...65.6 ft)
Statistical Error, Standard Deviation (1 sigma)		Typ. ± 10 mm (at range 1...20 m / ≥ 10% reflectivity / ≤ 5 kLux)
<b>Electrical</b>		
Data Interface		RS 232/RS 422 (configurable)
Transfer Rate		9.6/19.2/38.4/500 kBd
Switching Outputs, Standard Variants		3 x PNP; typ. 24 V DC; OUT A, OUT B maximum 250 mA, OUT C maximum 100 mA
Supply Voltage (scanner-electronics)		24 V DC ± 15% (maximum 500 mV ripple), current requirements maximum 1.8 A (including output load)
Power Uptake		Approx. 20 W (without upload)
Electrical Protection Class		Safety insulated, protection class 2
Interference Resistance		According to IEC 801, part 2-4; EN 50081-1/50082-2
Ambient Temperature (Operating / Storage)		0...50°C (32°...122°F) / -30°...70°C (-22°...158°F)
<b>Mechanical</b>		
Enclosure Rating		IP 65
Weight		Approx. 4.5 kg
Dimensions		185 x 156 x 210 mm (7.3 x 6.1 x 8.3 in); with cables: 185 x 156 x 265 (7.3 x 6.1 x 10.4 in)

**Ilustración 21. Especificaciones técnicas SICK LMS 291.**

Todas las características del telémetro láser, las podemos encontrar en el anexo III.

### 3.2. CONVERSOR SERIE USB

Para establecer la comunicación entre el telémetro láser y el PC, usamos un conversor puerto serie USB, modelo RedCom Meilhaus Electronic [REDCOM].



**Ilustración 22. Conversor serie USB Redcom [REDCOM].**

Dentro de la unidad, hay 10x2 (20 pines) bloques de cabecera, que son puenteados para seleccionar el modo de operación deseado, RS-422 o RS-485.

En nuestro caso, la conexión entre el telémetro láser y el conversor serie USB, se produce a través de una pequeña placa donde se encuentran puenteados los pines correspondientes.

### 3.3. ALIMENTACIÓN

El sistema de alimentación está compuesto por una batería de automóvil de 24V y de un sistema transformador de corriente alterna a continua de 1000W de potencia, unidos mediante un relé. El inversor de corriente elegido, de 1000W es un sistema sobredimensionado, debido a que se estima que en un futuro, el número de equipos y sistemas de adquisición sean mayores.

DISPOSITIVO	CONSUMO
Telémetro láser SICK LMS 291	20 W
PC Toshiba A660-13Q	350 W
<b>TOTAL CONSUMO</b>	<b>370 W</b>

Tabla 1. Consumo total del proyecto.

# **Capítulo 4.**

# **Arquitectura**

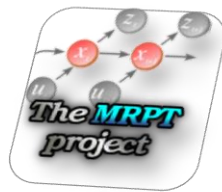
# **software**

#### 4. ARQUITECTURA SOFTWARE

En el presente capítulo, se explicarán los recursos software utilizados en el proyecto.

##### 4.1. LIBRERÍA DE ROBÓTICA: MRPT

MRPT (Mobile Robot Programming Toolkit) es una librería multiplataforma y abierta, implementada en lenguaje C ++, destinada a ayudar a los investigadores de robótica a diseñar e implementar algoritmos relacionados con la localización y el mapeado simultáneo (SLAM), la visión por computador y la planificación de movimiento.



En la actualidad, existe una amplia variedad de bibliotecas de software, tanto libre como de pago, que proporcionan a los desarrolladores una base de ayuda en la implementación de sistemas para robótica móvil. Desafortunadamente, muchas veces este apoyo adicional se reduce a partes concretas de la metodología de trabajo, necesitando una lógica extra que permita integrar las distintas partes, con el consiguiente consumo de recursos en términos de esfuerzo y tiempo.

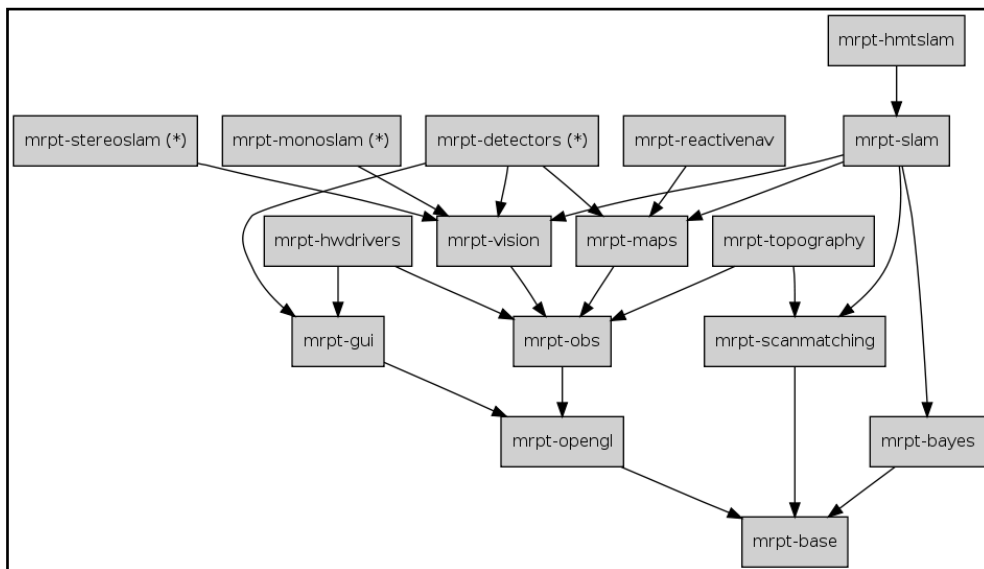


Ilustración 23. Librerías MRPT.

MRPT pertenece a un proyecto desarrollado por el MAPIR (*Machine Perception and Intelligent Robotics Group*), perteneciente al Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Málaga.

Esta librería, requiere de plataformas de apoyo, como CMake, openCV y wxWidgets [ReqMRPT]. Debido a la importancia de esta librería se incluye en el anexo II una guía completa de instalación.

La librería MRPT ha sido utilizada para interpretar los datos obtenidos del telémetro láser y así poder obtener los mapas basados en rejillas de ocupación.

A continuación, se explicarán las clases usadas en el presente proyecto.

#### 4.1.1. COBSERVATION2DRANGESCAN

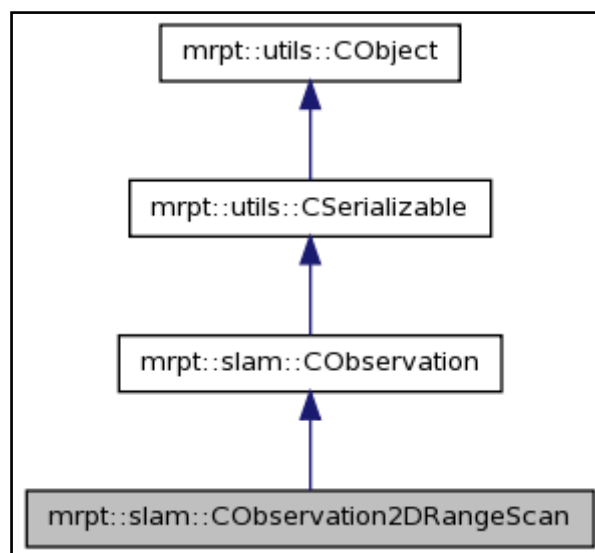


Ilustración 24. Clase `CObservation2DRangeScan`.

*SLAM: Librería que contiene algoritmos SLAM, como localización, construcción de mapas, representación de acciones de un robot, observaciones y numerosos mapas métricos.*

`CObservation2DRangeScan` representa la observación de cualquier robot, en este caso, el entorno del telémetro láser en 2D.

Esta clase, permite cualquier apertura del escaneo láser, llegando hasta los 360°, con una resolución típica de 1°, 0.5° ó 0.25°, entre otras.

Algunas funciones internas:

- Configuración de la apertura y la dirección del escaneo láser.
- Configuración de la apertura de cada rayo del escaneo.
- Inserción del error sigma del telémetro láser.

#### 4.1.2. CSIMPLEPOINTSMAP

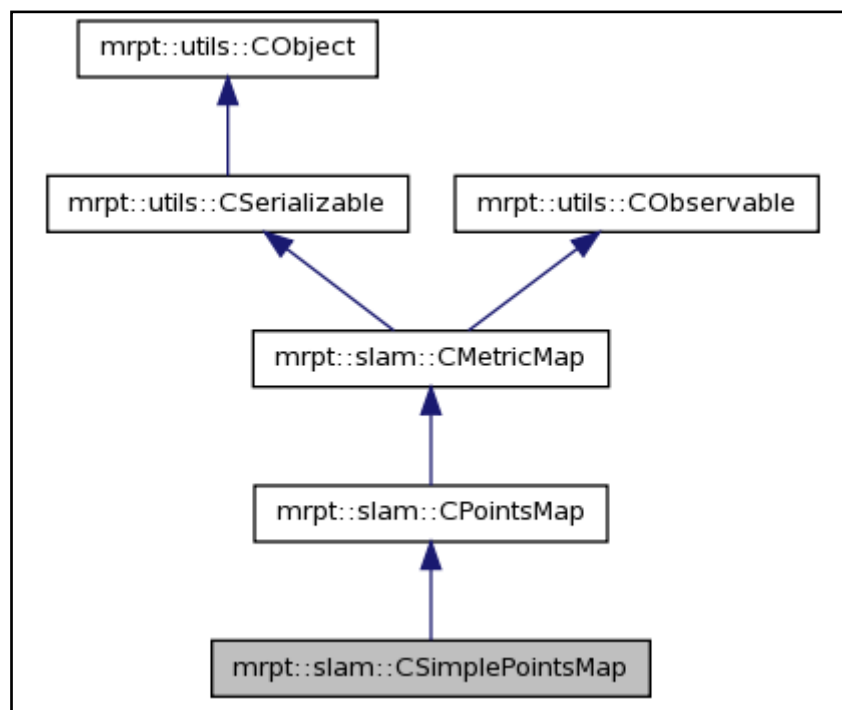


Ilustración 25. Clase CSimplePointsMap.

CSimplePointsMap permite construir una nube de puntos en 2D o 3D, a partir de una secuencia de un escaneo láser.

Algunas funciones internas:

- Permite representar puntos individuales en un mapa, almacenando sus coordenadas (x,y,z).
- Transforma la observación del telémetro láser (puntos en coordenadas polares) en puntos representados en un eje de coordenadas cartesianas.

#### 4.1.3. COCCUPANCYGRIDMAP2D

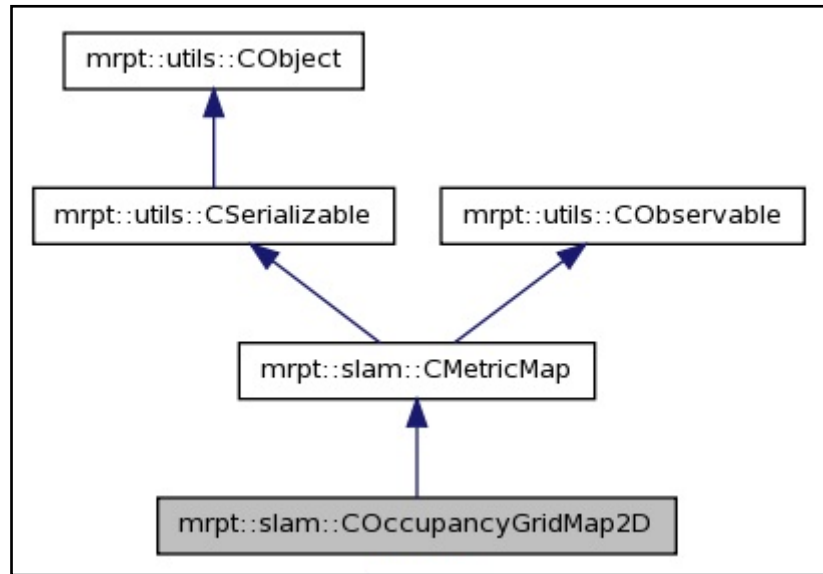


Ilustración 26. Clase COccupancyGridMap2D.

COccupancyGridMap2D almacena una representación métrica del entorno en forma de un mapa probabilístico de ocupación, formado por pequeñas celdas.

Dependiendo del valor probabilístico que contienen estas celdas, se pueden clasificar de la siguiente manera:

$$P_{celda}(i): \begin{cases} 0 < P_{celda}(i) < 0,5 & \text{celda ocupada} \\ P_{celda}(i) = 0,5 & \text{celda oculta} \\ 0,5 < P_{celda}(i) < 1 & \text{celda libre} \end{cases}$$

determinando así, las celdas ocupadas, libres o desconocidas del entorno.

##### Algunas funciones internas:

- Devuelve el área del grid map, en  $m^2$ .
- Permite cambiar el tamaño del grid map.
- Permite modificar de forma individual el valor probabilístico de las celdas
- Devuelve la resolución del grid map.
- Devuelve el grid map como una imagen, donde cada píxel es una celda. Estas celdas, son grises si son desconocidas (ocultas), blancas si son libres y negras si son ocupadas.



- *Guarda el grid map como una imagen.*
- *Carga una imagen externa (.jpeg, .png, .bmp,...) obteniendo su grid map.*
- *Se puede insertar la observación de un escaneo láser para obtener el grid map.*
- *Se puede construir el diagrama de Voronoi a partir del grid map, obteniendo además sus puntos críticos.*

#### 4.1.4. CIMAGE

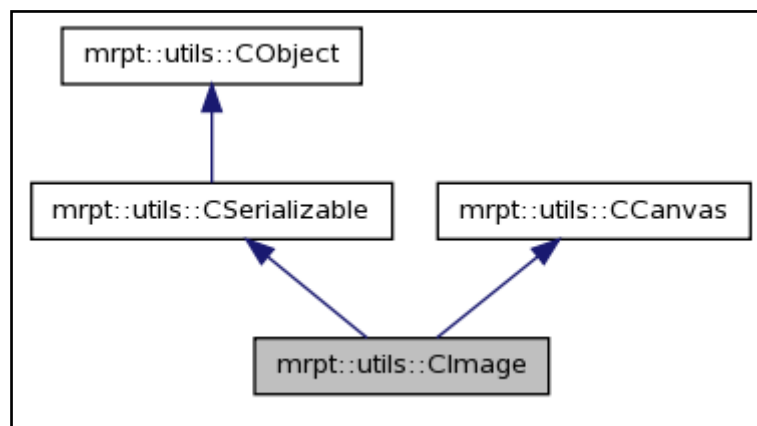


Ilustración 27. Clase CImage.

CImage almacena imágenes como un mapa de bits, tanto en escala de grises como en color (RGB (Red Green Blue)). Es compatible con el uso de la librería OpenCV.

##### Algunas funciones internas:

- *Permite cambiar el tamaño de una imagen.*
- *Filtra una imagen usando un filtro Gaussiano o aplicando la mediana.*
- *Permite visualizar mapas.*
- *Devuelve el contenido de cualquier píxel.*
- *Permite dibujar un rectángulo, un triángulo,...*
- *Guarda una imagen en diferentes formatos (.jpeg, .png, .bmp)*

#### 4.1.5. CDISPLAYWINDOWPLOTS

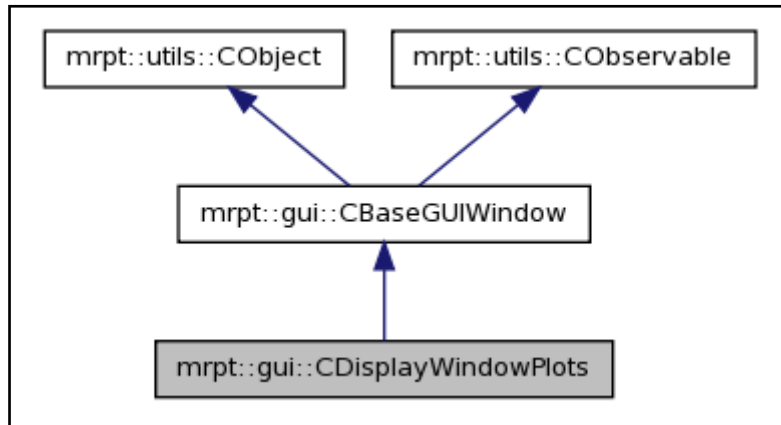


Ilustración 28. Clase CDisplayWindowPlots.

GUI: Librería empleada para la creación de ventanas 2D y 3D para visualizar los resultados.

CDisplayWindowPlots permite crear una interfaz gráfica para visualizar los resultados.

##### Algunas funciones internas:

- *Permite obtener las coordenadas x,y del último clic.*
- *Cambiar la posición de una ventana dentro de la pantalla.*

#### 4.2. LIBRERÍA DE VISIÓN POR COMPUTADOR: OPENCV

OpenCV es una librería libre de visión por computador originalmente desarrollada por Intel. Es multiplataforma y contiene más de 500 funciones que abarcan una gran gama de áreas en el proceso de visión, como reconocimiento de objetos, reconocimiento facial, calibración de cámaras, visión estéreo y visión robótica. Es la más descargada, con más de dos millones de descargas.



La librería openCV ha sido utilizada para visualizar por pantalla los resultados procedentes del telémetro láser, tales como los mapas de rejillas de ocupación. Además nos ha permitido representar en una ventana la detección de movimiento, usando para ello algunas de las funciones gráficas de las que dispone.

### 4.3. COMUNICACIÓN SOFTWARE CON EL TELÉMETRO LÁSER

En este apartado se incluirán los diferentes paquetes de comunicación con el telémetro láser que tuvieron que ser programados para implementar la comunicación.

**Nota:** Durante la explicación del protocolo se realizarán explicaciones que incluyen datos en base hexadecimal, para lo que se empleará la notación 0x que implica que el número a continuación será un número en base hexadecimal.

#### 4.3.1. ESTRUCTURA GENERAL DE LOS PAQUETES

La estructura de los paquetes es la siguiente:

	Frame				Commands and data			Frame	
Description	STX	Address	Length		Command/ Response	Data		Checksum	
Byte position	1	2	3	4	5	6 to n		n+1	n+2

Tabla 2. Estructura de los paquetes.

Los campos son:

- **STX:** Es el byte de inicio de transmisión (02 en formato hexadecimal).
- **Address:** Es la dirección del emisor, sirve para diferenciar diferentes láseres SICK que trabajen de forma sincronizada.
- **Length:** Son dos bytes que representan el tamaño de los datos que vienen a continuación del paquete, excluyendo el checksum.
- **Command/response:** Es el byte identificador del comando que se está enviando.
- **Data:** Es el cuerpo del paquete, donde se envían los diferentes datos. Los primeros N bytes son los datos de los diferentes paquetes. El último byte es el byte de estado que envía el láser de vuelta a una petición (sólo es enviado por el láser).
- **Checksum:** Es el código de errores que comprueba que la transmisión es correcta (2 bytes).

### 4.3.2. PROTOCOLO DE COMUNICACIONES

En esta sección se van a explicar los diferentes paquetes enviados al telémetro láser y las diferentes respuestas que éste proporciona.

#### 4.3.2.1. PAQUETE DE CAMBIO DE VELOCIDAD

Description	STX	Address	Length		Command	Data	Checksum	
Byte position	1	2	3	4	5	6	7	8
Hex. value	02	00	02	00	20			

Tabla 3. Paquete de cambio de velocidad en la transmisión.

El comando es el 0x20. Y el campo “Dato” variará según la velocidad a la que se pretenda configurar la transmisión:

VELOCIDAD ORIGINAL	VALOR DEL BYTE “DATO”
9600 bps	0x40
19200 bps	0x41
38400 bps	0x42
500000 bps	0x48

Tabla 4. Codificación de la velocidad del telémetro láser en comando 0x20.

#### 4.3.2.2. RESPUESTA AL CAMBIO DE VELOCIDAD

Description	STX	Address	Length		Response	Data		Checksum	
						Data	LMS status		
Byte position	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Hex. value	02	80	03	00	A0	00	10	16	0A

Tabla 5. Paquete de respuesta a cambio de velocidad en la transmisión.

El campo “Dato” puede tener dos valores, 0x00 para un cambio correcto y 0x01 para fallo en el cambio de velocidad.

Como puede observarse, si el paquete es enviado por el telémetro láser SICK, el campo *address* tiene un valor 0x80, y si es un paquete enviado por el ordenador, el valor es 0x00.

#### 4.3.2.3. PAQUETE DE INICIALIZACIÓN

Para asegurar la estabilidad de la conexión, antes de realizar cualquier petición será necesario enviar un mensaje al telémetro láser para comprobar la conectividad. En la implementación, se decidió utilizar el comando 0x31, que corresponde con el mensaje de petición de estado del láser. El mensaje es de la siguiente forma:

Description	STX	Address	Length		Command	Data	Checksum	
Byte position	1	2	3	4	5	-	6	7
Hex. value	02	00	01	00	31	-	15	12

**Tabla 6. Mensaje de petición de estado.**

#### 4.3.2.4. RESPUESTA AL PAQUETE DE INICIALIZACIÓN

Una vez enviada la petición de estado, se podrá proceder a la petición de datos al láser. El mensaje que se recibe una vez realizada la petición de estado con el comando 0x31 es el siguiente:

Description	STX	Address	Length		Response	Data		Checksum	
						Data	LMS status		
Byte position	1	2	3	4	5	6 to 158	159	160	161
Hex. value	02	80	9A	00	B1	152 bytes	10	74	52

**Tabla 7. Mensaje de estado.**

El mensaje de estado contiene información sobre el tipo de codificación de la distancia, versión del firmware del láser, etc.

#### 4.3.2.5. PETICIÓN SIMPLE DE DATOS

El comando 0x30 corresponde a petición de datos de medida. Con el subcomando 0x01 en el campo "Dato", se realiza la petición de todos los puntos del campo de visión configurado en el láser.

Description	STX	Address	Length		Command	Data	Checksum	
Byte position	1	2	3	4	5	6	7	8
Hex. value	02	00	02	00	30	01	31	18

**Tabla 8. Mensaje de petición de datos.**

## 4.3.2.6. RESPUESTA A PETICIÓN SIMPLE DE DATOS

Description	STX	Address	Length		Command	Data		Checksum	
						Data	LMS status		
Byte position	1	2	3	4	5	6 to 729	730	731	732
Hex. value	02	80	D6	02	B0	724 bytes	10	15	D4

Tabla 9. Respuesta a petición simple.

El comando respuesta es el comando 0xB0. El número de datos en el campo “Dato” varía dependiendo de la configuración del campo de visión del láser. Por ejemplo, para un campo de visión de 100° y una resolución de 0,25°, el número total de puntos será  $100/0,25+1$  (punto en el origen) = 401. Como cada distancia está codificada en 2 bytes, hay un total de 802 bytes de datos de medida. Los dos primeros byte de datos dan información de la codificación, añadiendo los bytes de comando y LMS status, lo que hacen un total de 806 bytes.

LMS mode		LMS output data string header	Number of transferred measurement data values
Angular range	Angular resolution		
0°..100°	1°	02 81 CE 00 B0 65 00 ...	101
0°..100°	0.5°	02 81 96 01 B0 C9 00 ...	201
0°..100°	0.25°	02 81 26 03 B0 91 01 ...	401
0°..180°	1°	02 81 6E 01 B0 B5 00 ...	181
0°..180°	0.5°	02 81 D6 02 B0 69 01 ...	361

Tabla 10. 401 puntos para configuración 100° y resolución 0,25°.

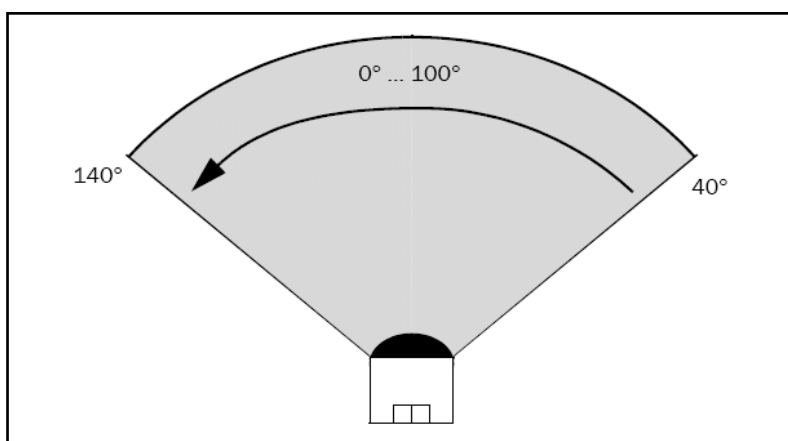


Ilustración 29. Campo de visión modo 100°.

Los dos primeros bytes recibidos dan información de la codificación de los datos de la siguiente forma:

- **Bit 15 y 14:**

- 0 0: Unidad en cm
- 0 1: Unidad en mm
- 1 X: Reservados

- **Bit 13:**

- 0: Escaneo completo
- 1: Escaneo parcial

- **Bit 12 y 11 (codifican el número de escaneo parcial):**

- 0 0: Valores medido pertenecen al escaneo x.00°
- 0 1: Valores medido pertenecen al escaneo x.25°
- 1 0: Valores medido pertenecen al escaneo x.50°
- 1 1: Valores medido pertenecen al escaneo x.75°

Los valores devueltos como medida de distancia son devueltos en sentido horario, partiendo desde la izquierda, cada dos bytes codifican la distancia, en la resolución espacial (cm o mm) configurada, de la siguiente forma:

	More significant data byte								Less significant data byte							
Bit number	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Binary value in 2 <sup>n</sup>	2 <sup>15</sup>	2 <sup>14</sup>	2 <sup>13</sup>	2 <sup>12</sup>	2 <sup>11</sup>	2 <sup>10</sup>	2 <sup>9</sup>	2 <sup>8</sup>	2 <sup>7</sup>	2 <sup>6</sup>	2 <sup>5</sup>	2 <sup>4</sup>	2 <sup>3</sup>	2 <sup>2</sup>	2 <sup>1</sup>	2 <sup>0</sup>
Hex. value	00 to FF								00 to FF							
Dec. value	0 to 65535															

**Tabla 11. Codificación de distancias [i].**

Los valores de estos bits, así como el número de bits empleados varían dependiendo de la configuración de la distancia máxima a medir (*measurement range*):

Measurement range	Measured value resolution	Data bits used	Max. representation Hex. value	Max. measurement range representation
8 m (26.25 ft)	10 mm (0.39 in)	13	1FF7h	8.183 m (26.84 ft)
16 m (52.49 ft)	10 mm (0.39 in)	14	3FF7h	16.385 m (53.75 ft)
32 m (104.98 ft)	10 mm (0.39 in)	15	7FF7h	32.759 m (107.47 ft)
80 m (262.5 ft)	100 mm (3.94 in)	13	1FF7h	81.83 m (268.46 ft)

**Tabla 12. Codificación de distancias [ii].**

El resto de bits se denominan flags y no se tienen en cuenta para el procesamiento de los datos.

#### 4.3.2.7. PETICIÓN DE DATOS CONTINUA

Para realizar la detección en tiempo real se configura el láser en modo de envío de datos continuo. De esta forma se enviará un paquete de datos cada 52msecs.

El comando de cambio de modo de operación del láser es el comando 0x20 con el subcomando 0x24, que corresponde a modo de operación continuo, se codificaría el modo de envío continuo.

Description	STX	Address	Length		Command	Data	Checksum	
Byte position	1	2	3	4	5	6	7	8
Hex. value	02	00	02	00	20	24		

Tabla 13. Cambio de modo a petición continua.

#### 4.3.2.8. RESPUESTA A PETICIÓN DE DATOS CONTINUA

El comando de respuesta 0xA0 es la respuesta que envía el láser de vuelta indicando que la operación se ha realizado correctamente.

Description	STX	Address	Length		Response	Data		Checksum	
						Data	LMS status		
Byte position	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Hex. value	02	80	03	00	A0	00	10	16	0A

Tabla 14. Byte de respuesta al cambio de modo de operación.

A partir de éste momento, el laser envía cada 52msecs un paquete con el mismo formato que el paquete de respuesta a petición simple.

#### 4.3.2.9. FIN DE MODO CONTINUO

El último paquete codificado para la comunicación con el láser es el de fin de envío continuo, este paquete cambia de modo continuo a modo bajo petición de nuevo, dejando, a partir de ese momento, el láser de realizar envíos de forma continua cada 52 msecs.

Description	STX	Address	Length		Command	Data	Checksum	
Byte position	1	2	3	4	5	6	7	8
Hex. value	02	00	0A	00	20	25		

Tabla 15. Comando de cambio a modo bajo petición.

El comando para cambiar de modo, al igual que para el envío continuo, es el 0x20, pero en esta ocasión, es el subcomando 0x25 el que indica que se requiere el modo de envío de datos bajo petición.



#### 4.3.2.10. RESPUESTA A FIN DE MODO CONTINUO

La respuesta a este envío es la misma que para el cambio a modo continuo.

#### 4.3.3. FLUJOGRAMA DE FUNCIONAMIENTO

Una vez conocidos los comandos que se emplearán, se explicará el proceso a seguir por el programa de comunicaciones mediante el siguiente flujograma.

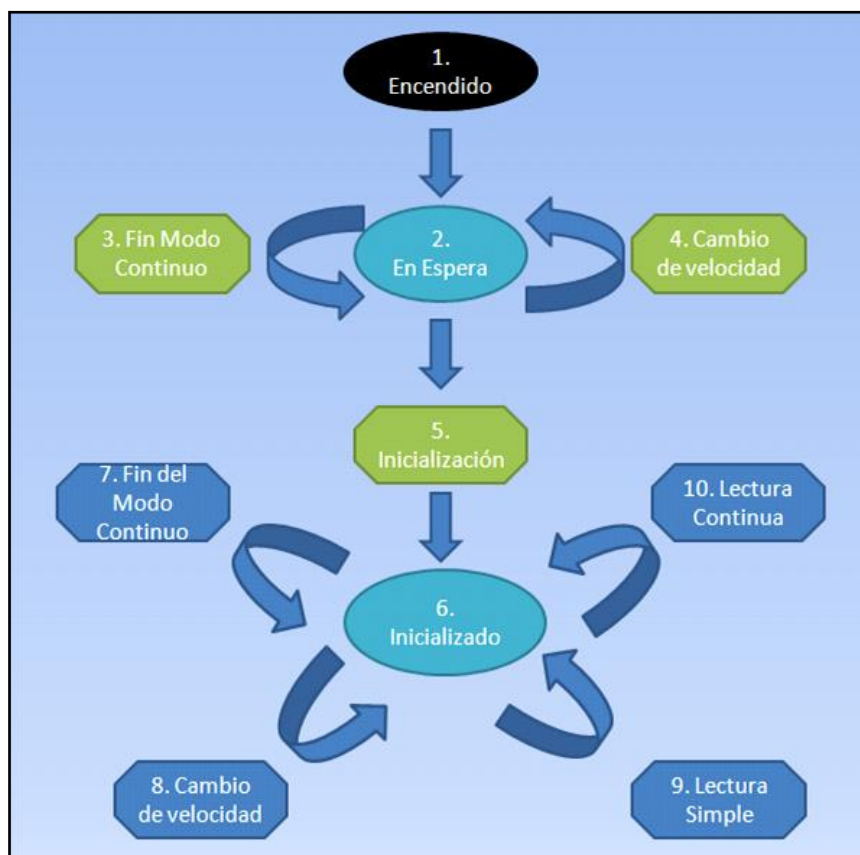


Ilustración 30. Flujograma de funcionamiento del programa de comunicaciones.

1. **Encendido.** Al conectar el sistema a la red, es necesario una espera de un tiempo de *inicialización*, hasta que el sistema está en disponibilidad de iniciar la comunicación.
2. **En Espera.** El láser está inicializado, pero la conexión no se ha establecido.

3. **Fin de Modo Continuo.** Antes de proceder a la comunicación se permite realizar esta acción, ya que en caso de que el láser, en una ejecución anterior, estuviese enviando datos de forma continua, seguirá todavía enviándolos y hará inviable otro tipo de comunicación con él, como el envío de paquete de estado/inicialización.
4. **Cambio de Velocidad.** Igual que en el caso anterior, es posible que una salida repentina del programa haya dejado el láser configurado a una velocidad inapropiada, con esta opción se envía un paquete de configuración al láser para que pase a la máxima velocidad 500Kbps, y se configura el puerto a esta velocidad, luego si alguna de las dos partes tenía una configuración diferente, de esta forma, se configuran las velocidades correctamente.
5. **Inicialización.** Se envía el paquete de petición de estado/inicialización (comando 0x31) y se espera la respuesta, en caso de ser respuesta afirmativa, se activa la conexión, es decir, se pasa a modo iniciado y se esperan peticiones de paquetes.
6. **Iniciado.** En este estado es posible realizar y recibir petición de paquetes.
7. **Fin del Modo Continuo.** Para cambiar de recepción continua de paquetes a recepción bajo petición.
8. **Cambio de Velocidad.** Cambia la velocidad a 500Kbps.
9. **Lectura Simple.** Realiza la petición de una medida al radar láser. Una vez recibido el paquete de datos lo muestra por pantalla y envía los datos a ser procesador por la aplicación de fusión sensorial.
10. **Lectura Continua.** Cambia de modo para proceder a la lectura continua de paquetes. Cada paquete de datos recibidos se muestran en pantalla y se mandan a procesar a la aplicación de fusión sensorial.

# **Capítulo 5.**

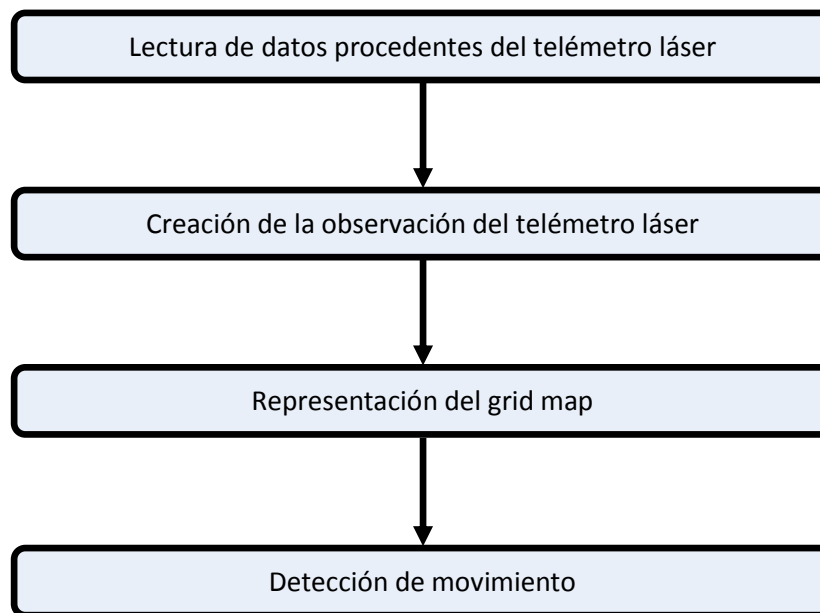
# **Implementación**

## 5. IMPLEMENTACIÓN

En el presente capítulo se detallará la implementación del proyecto y se explicará mediante diagramas de bloques el código estructurado para llevar a cabo dicho proyecto.

La representación del entorno ha sido llevada a cabo mediante el método de mapeado: rejillas de ocupación.

### 5.1. ESQUEMA GENERAL DE IMPLEMENTACIÓN



### 5.2. OBTENCIÓN DE DATOS PROCEDENTES DEL TELÉMETRO LÁSER

A continuación se detalla la forma de obtención de los datos procedentes del telémetro láser. Estos datos corresponden a la distancia a la que se encuentran los obstáculos del entorno del telémetro láser, correspondiente a un barrido de 100°.

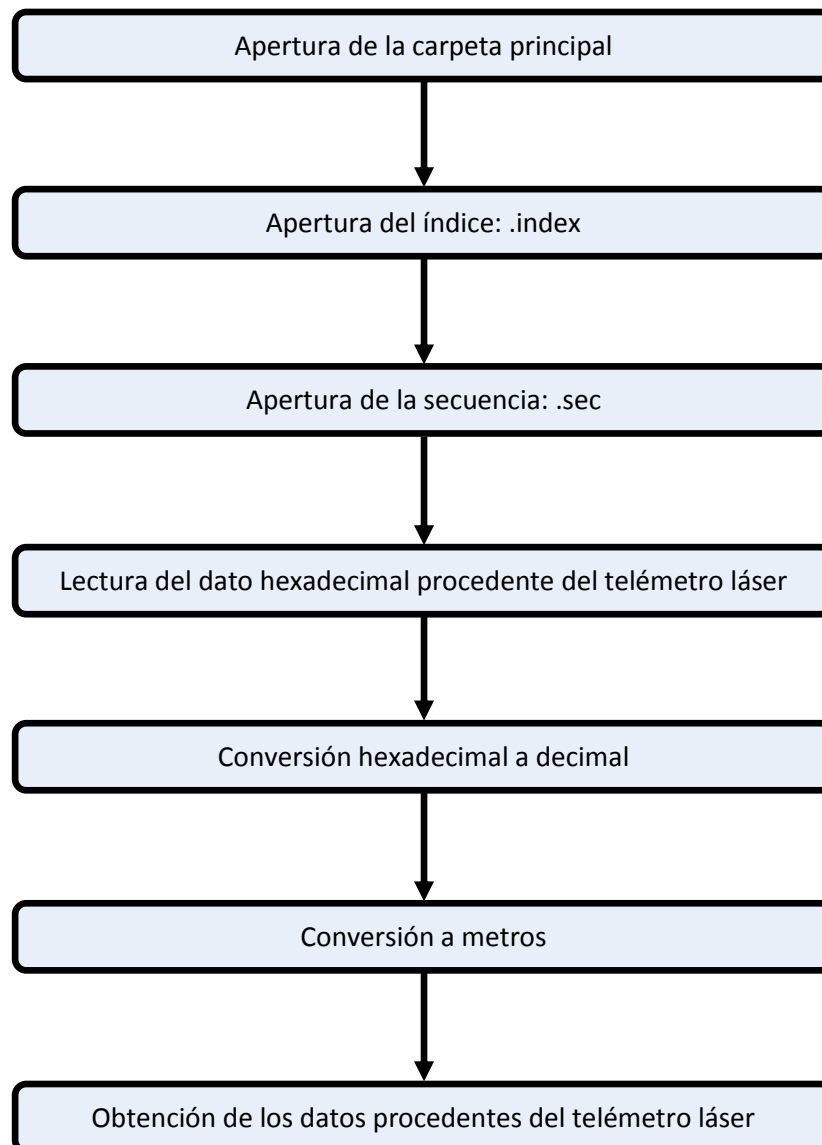
Existen dos formas de acceso a estos datos: en diferido y en tiempo real.

En diferido, los datos procedentes del telémetro láser están grabados en secuencias, almacenadas en un directorio, al cual se accede y se extraen dichos datos, para su posterior representación.

Y en tiempo real, como su propio nombre indica, se accede a los datos a través de la comunicación en tiempo real con el telémetro láser con la inmediata representación del entorno.

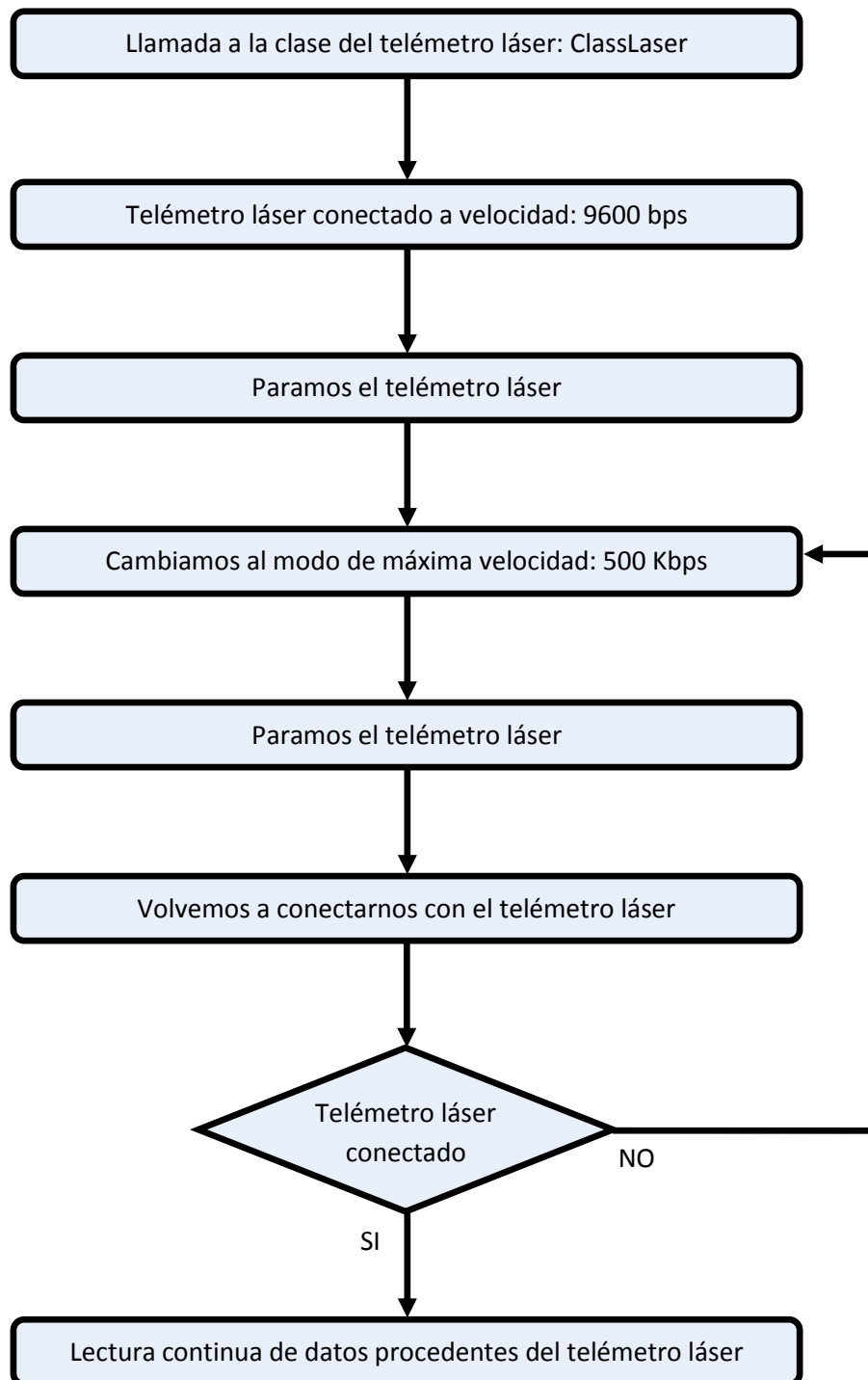
Estas dos formas de acceso a los datos, se explican mediante los siguientes flujogramas.

### 5.2.1. OBTENCIÓN DE DATOS EN DIFERIDO



*Nota: Los datos obtenidos del telémetro láser son datos hexadecimales correspondientes a la distancia que existe entre el obstáculo y dicho telémetro láser, en un barrido de 100°, obteniendo una distancia cada 0,25°. Esta distancia viene dada en centímetros.*

### 5.2.2. OBTENCIÓN DE DATOS EN TIEMPO REAL



### 5.3. REPRESENTACIÓN DEL GRID MAP

El grid map es el mapa de rejillas de ocupación obtenido tras la lectura de los datos procedentes del telémetro láser. En él se observan claramente las zonas libres, ocupadas o desconocidas del entorno.

Las características más importantes de los grid maps creados para la aplicación son las siguientes:

- ÁREA

$$\text{Ancho} = 164m$$

$$\text{Alto} = 94m.$$

$$\text{Área grid map} = 164m \times 94m = 15416 m^2$$

- NÚMERO DE CELDAS

$$\text{Filas} = 376$$

$$\text{Columnas} = 656$$

$$\text{Número total de celdas} = 376 \times 656 = 246656 \text{ celdas}$$

- EQUIVALENCIA CELDA-PIXEL

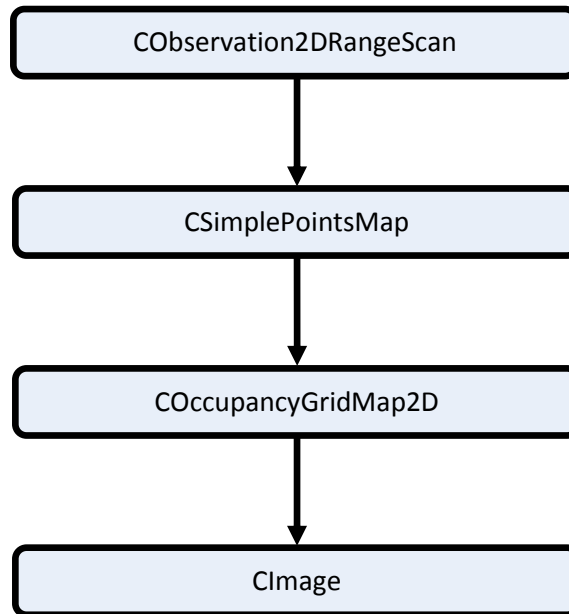
$$1 \text{ celda} = 1 \text{ píxel}$$

- TAMAÑO DE UNA CELDA

$$\text{Área de una celda} = \frac{15416 m^2}{246656 \text{ celdas}} = 0,0625 m^2 = 62,5 cm^2$$

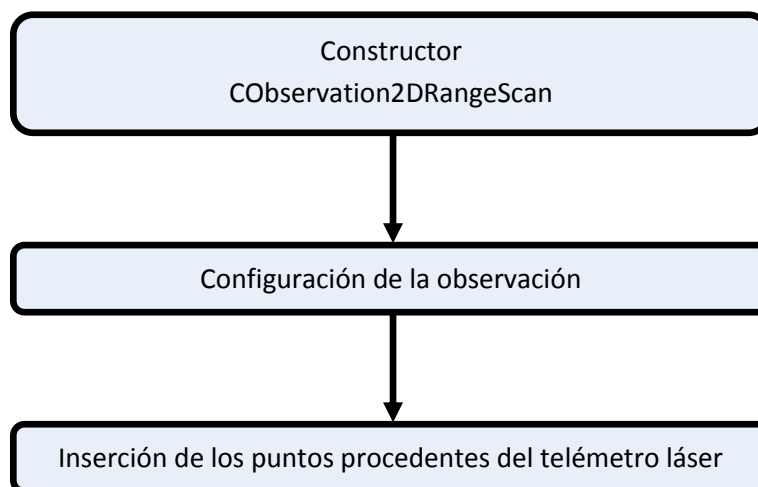
$$\text{Lado de una celda} = \sqrt{62,5} = 0,25 cm$$

En el siguiente flujograma observamos a nivel general, las clases usadas para la obtención del grid map.



A continuación, se desglosa este flujograma general.

### 5.3.1. CREACIÓN DE LA OBSERVACIÓN DEL TELÉMETRO LÁSER





### 5.3.2. REPRESENTACIÓN DE PUNTOS EN EJE DE COORDENADAS XY

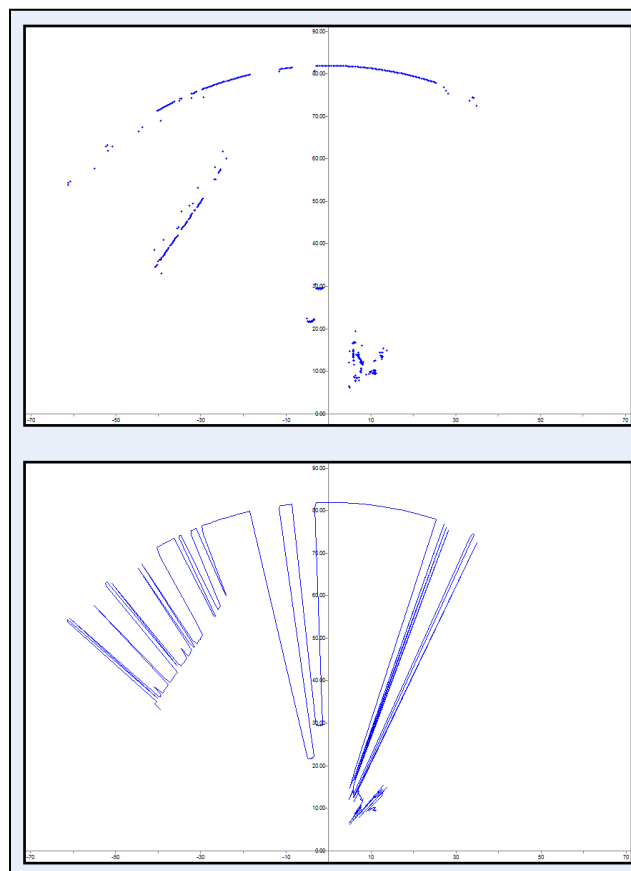
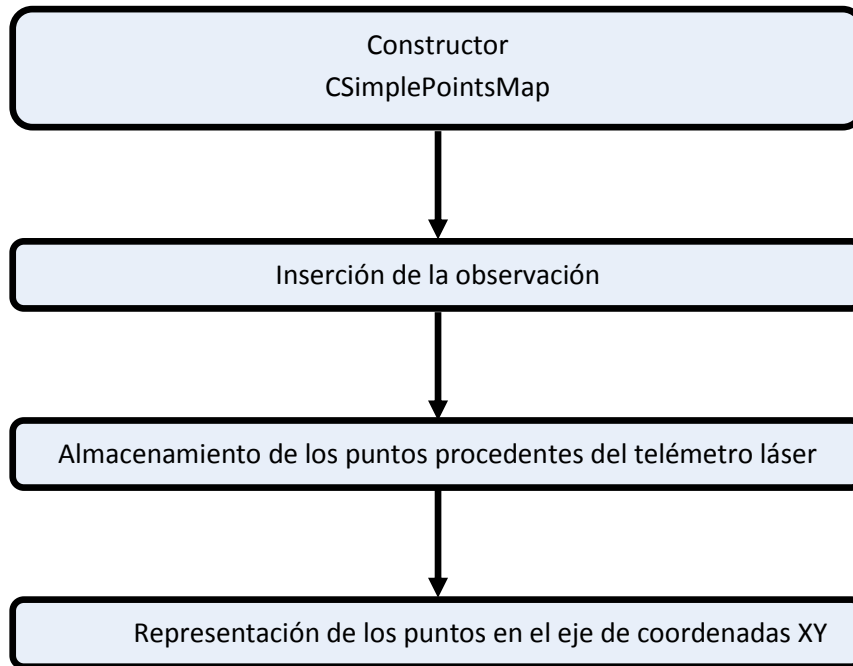
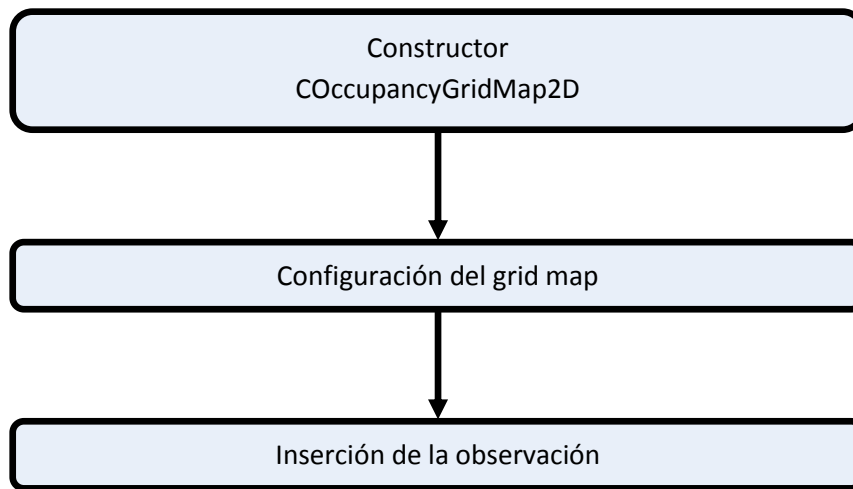


Ilustración 31. Ejemplo de puntos en ejes XY.

### 5.3.3. CREACIÓN DEL GRID MAP

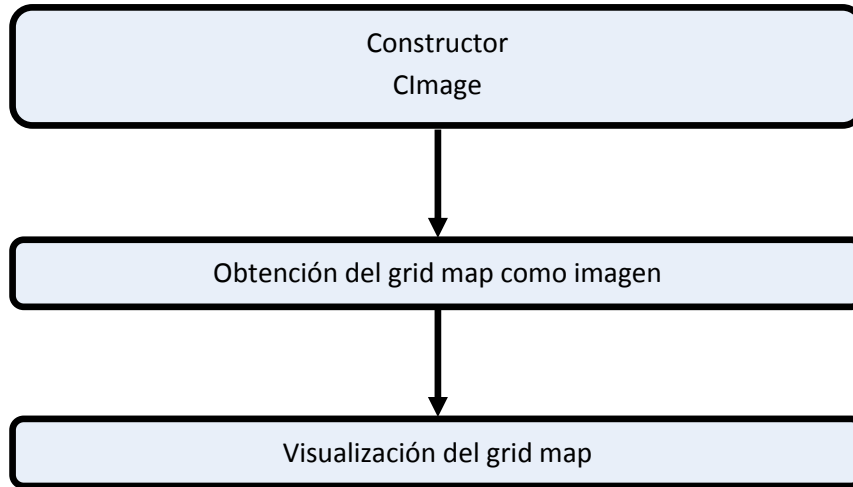


En nuestro proyecto creamos dos tipos de grid maps, idénticos en cuanto a características se refiere, pero distintos en cuanto a probabilidades de ocupación, es decir, por un lado tendremos un grid map histórico correspondiente a toda la historia de lecturas hasta el tiempo  $t$ , y por otro, un grid map actual correspondiente sólo a la última lectura del telémetro láser en el tiempo  $t$  actual.

Las probabilidades de ocupación que aparecen en las celdas o coordenadas del grid map histórico, son las correspondientes a toda la historia de medidas, llegando a la convergencia en muchos casos, cuando por ejemplo, con casi total seguridad la celda está libre u ocupada, tras una serie de lecturas.

En cambio, las probabilidades en el grid map actual, corresponden a la última lectura y por lo tanto, los valores de ocupación tienden a caracterizar la celda o coordenada como libre u ocupada, pero sin llegar a valores de convergencia. Lo que más nos interesa de este grid map, además de conocer el estado actual de los obstáculos, son las celdas o coordenadas ocultas tras los obstáculos detectados, también llamadas desconocidas y que tienen una probabilidad de ocupación asociada de 0,5 y que nos permite entonces poder comparar las probabilidades de ambos mapas para una coordenada en concreto, con el objetivo de poder detectar obstáculos en movimiento.

#### 5.3.4. VISUALIZACIÓN DEL GRID MAP



La representación del grid map viene dada en escala de grises. Esta escala la marca la probabilidad de ocupación asociada a cada celda o coordenada del mapa de la siguiente manera:

$$P_{celda}(i): \begin{cases} 0 < P_{celda}(i) < 0,5 \\ P_{celda}(i) = 0,5 \\ 0,5 < P_{celda}(i) < 1 \end{cases} \quad \begin{array}{l} celda\ ocupada = color\ negro \\ celda\ oculta = color\ gris \\ celda\ libre = color\ blanco \end{array}$$

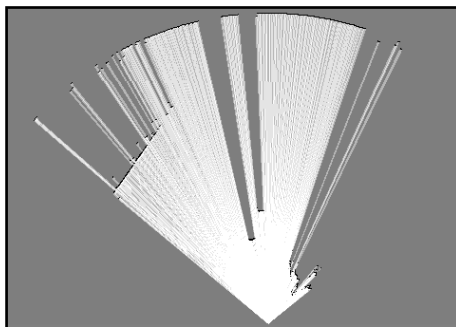


Ilustración 32. Ejemplo de grid map.

#### 5.4. DETECCIÓN DE MOVIMIENTO

La detección de movimiento se ha implementado con un algoritmo propio que consiste en comparar el grid map actual con el grid map histórico, detectando aquellas coordenadas en las cuales el valor de probabilidad de ocupación es distinto en ambos mapas, permitiéndonos entonces decir con casi total certeza que en esa coordenada existe un obstáculo en movimiento.

##### 5.4.1. ALGORITMO DE DETECCIÓN DE MOVIMIENTO

En la siguiente ilustración se explica gráficamente la base del algoritmo.

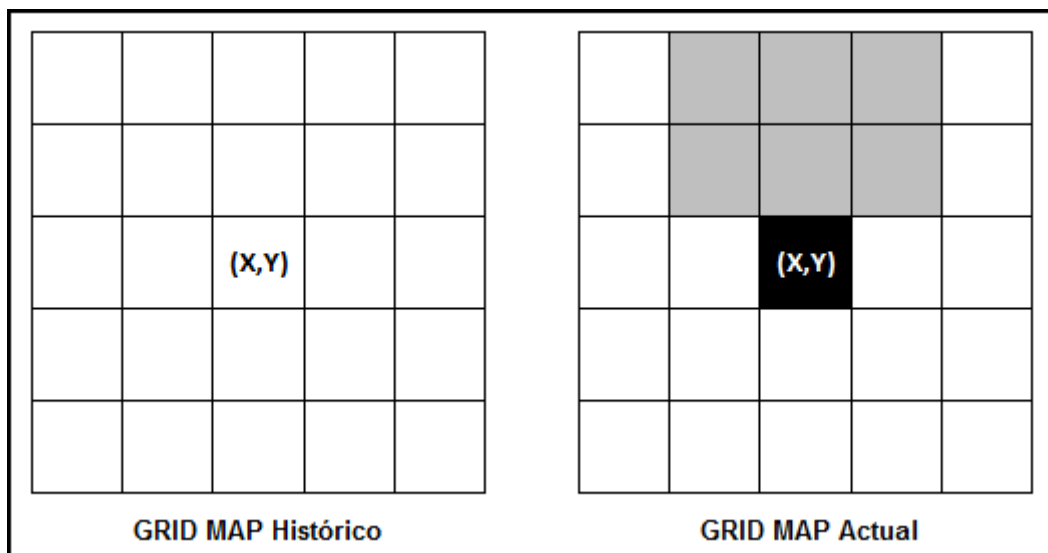


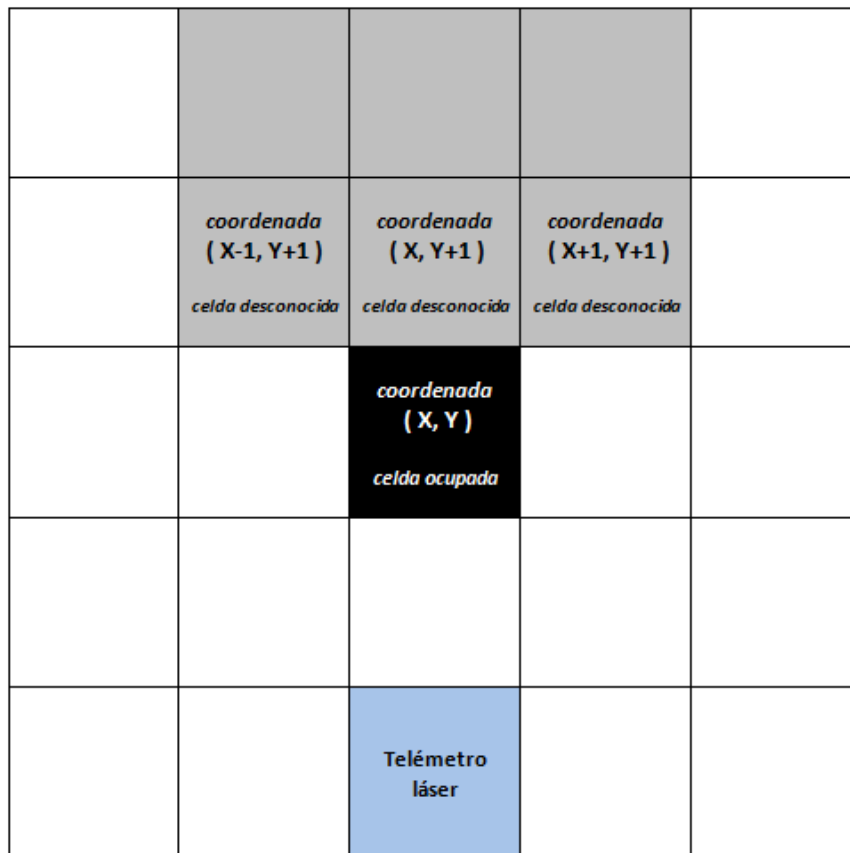
Ilustración 33. Dibujo ilustrativo: Base del algoritmo de detección de movimiento.

A la izquierda de la imagen aparece un dibujo ilustrativo del grid map histórico en el instante de tiempo  $t$ , donde se observan que todas las celdas están libres (color blanco y probabilidad de ocupación mayor de 0,5, llegando incluso a valores próximos a 1). Como sabemos, las probabilidades de ocupación en este grid map, tienden a la convergencia, por lo que sus valores de probabilísticos no variarán drásticamente.

A la derecha de la ilustración, aparece el grid map actual en ese mismo instante de tiempo  $t$ , donde se observa que la celda  $(x,y)$  está ocupada (color negro y probabilidad de ocupación menor de 0,5, llegando a valores cercanos a 0). Tras ella, aparecen celdas desconocidas u ocultas (color gris y probabilidad de ocupación igual a 0,5), de las cuáles luego nos ocuparemos. Y también existen otras zonas del mapa libres.

Pero lo que realmente nos interesa de este instante de tiempo, es la coordenada (x,y). Esta coordenada, en el grid map histórico tiene una probabilidad alta de ser libre (cercana a 0,9099 y que gracias a la convergencia no va a caracterizarse como ocupada instantáneamente), por su parte, en el grid map actual tiene una probabilidad alta de ser ocupada (en torno a 0,0035), por lo que si esto se cumple podemos pensar a priori que nos encontramos ante un obstáculo nuevo en nuestro entorno.

El siguiente paso es analizar el grid map actual, para asegurarnos de que estamos ante un obstáculo. Para ello, en la siguiente ilustración, podemos observar un dibujo explicativo del grid map actual correspondiente a la última lectura del telémetro láser, donde se ha detectado un posible nuevo obstáculo en la coordenada (x,y).

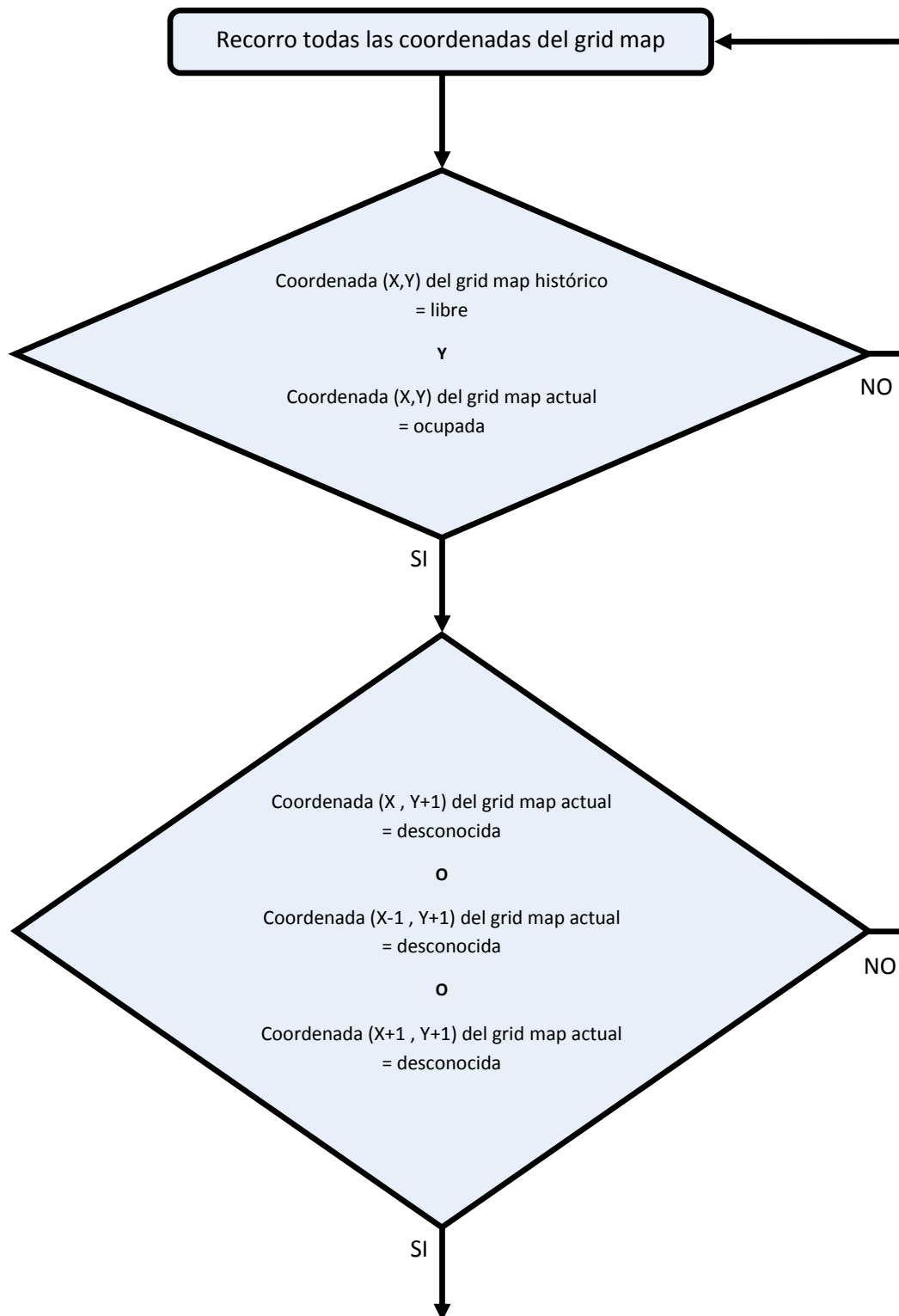


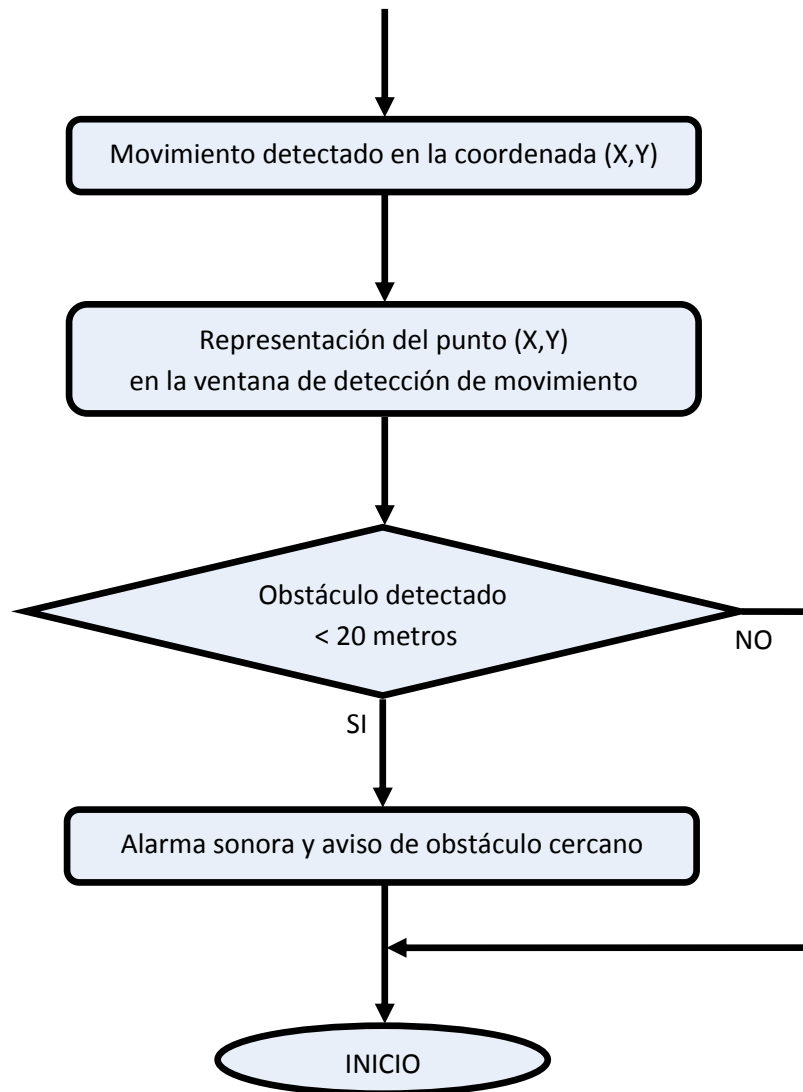
**Ilustración 34.** Dibujo ilustrativo del grid map actual en la detección de movimiento.

La celda negra corresponde a la coordenada donde se ha detectado el posible obstáculo tras comparar la probabilidad de ocupación de dicha coordenada entre el grid map histórico y el grid map actual, como hemos explicado anteriormente.

Las celdas grises corresponden a las celdas ocultas o desconocidas tras el obstáculo de la coordenada (x,y). Cuando se detecta un obstáculo, estas celdas desconocidas se representan en color gris y aparecen con una probabilidad de 0,5. Esta es la ventaja de obtener un grid map actual de la última lectura, que nos aseguramos de que detrás de un obstáculo, las celdas serán ocultas y el valor de probabilidad será 0,5 (valor a priori que toman todas las celdas).

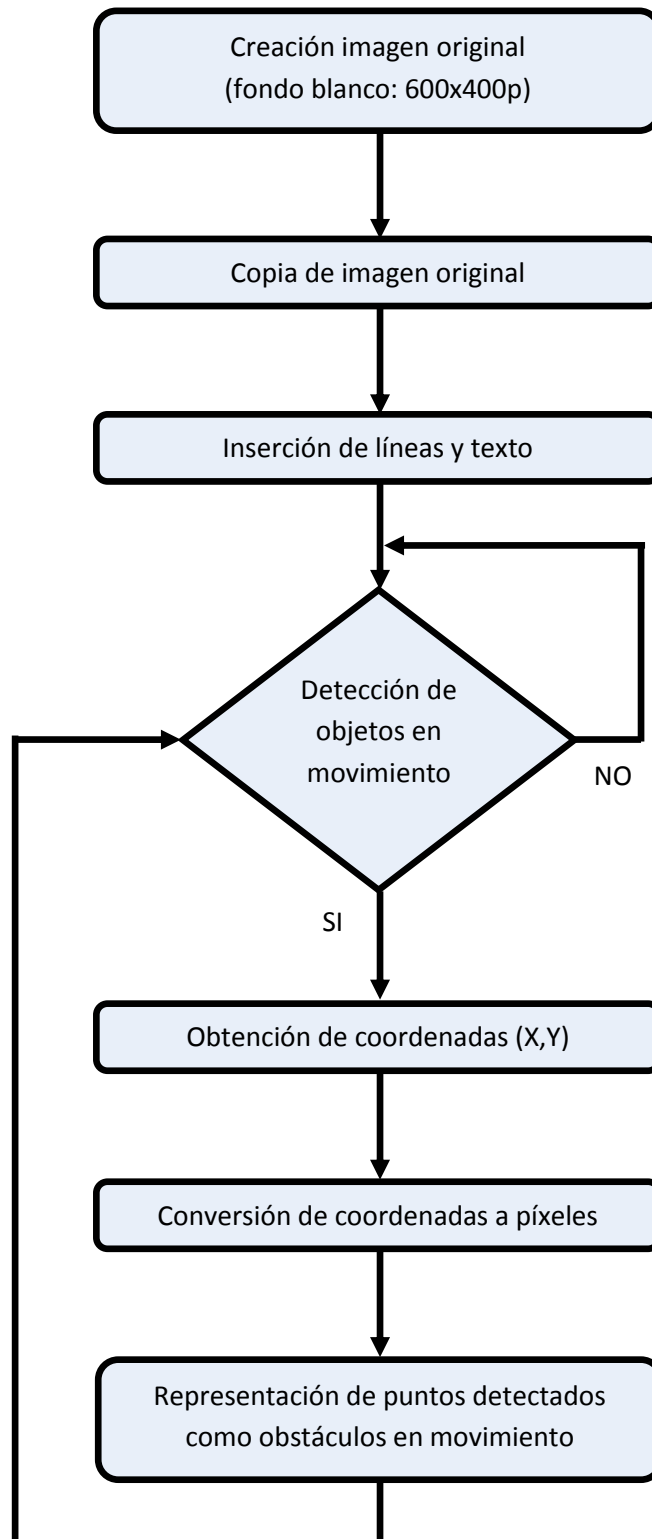
Entonces, comparando ambos grid maps y analizando el grid map actual, podemos llegar al siguiente algoritmo, que a continuación se explica mediante un flujograma.





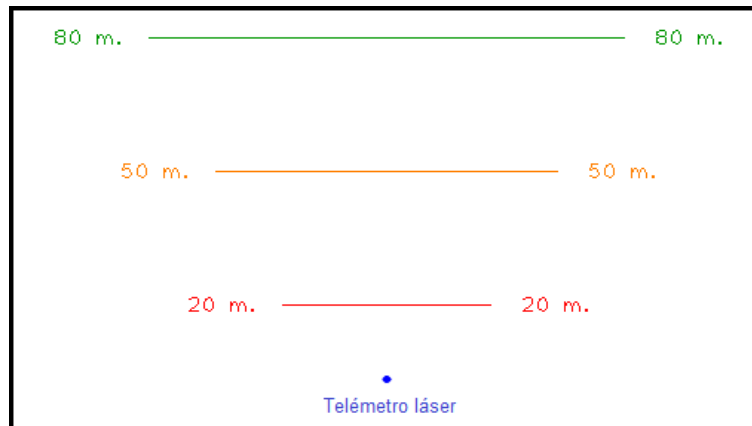
En el siguiente apartado, veremos mediante un flujograma, el algoritmo de representación de los obstáculos detectados, haciendo uso de la librería openCV.

#### 5.4.2. REPRESENTACIÓN DE OBSTÁCULOS EN MOVIMIENTO





Sobre la imagen original (fondo blanco) se insertan mediante el uso de funciones gráficas de openCV, líneas que marcan las distancias correspondientes a 20m, 50m y 80m, como se muestra en la siguiente captura.



**Ilustración 35. Ventana creada para representar obstáculos en movimiento.**

En la siguiente ilustración, se muestra esta ventana cuando se detecta un obstáculo, en este caso un vehículo, como aparece en la imagen capturada de la secuencia.

Los obstáculos detectados se representan con puntos. En este caso además, se muestra un mensaje de texto avisando al conductor de la presencia de un obstáculo en movimiento a una distancia inferior a 20m.



**Ilustración 36. Ventana detección de obstáculos con mensaje de alerta.**

# **Capítulo 6.**

# **Resultados**

## 6. RESULTADOS

En este capítulo se presentarán los resultados obtenidos tras el desarrollo de la aplicación.

En la siguiente ilustración podemos ver una captura en tiempo de ejecución.

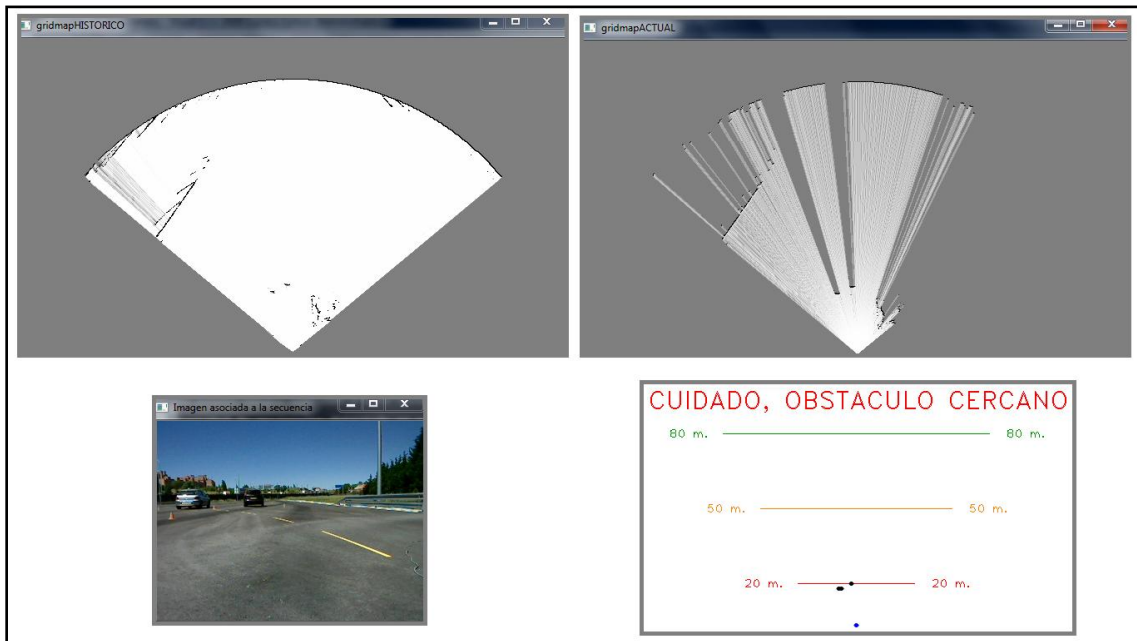


Ilustración 37. Ejemplo de la aplicación en tiempo de ejecución.

En la parte superior, a la izquierda podemos observar el grid map histórico correspondiente a la historia de medidas hasta el tiempo actual  $t$ . A la derecha, aparece el grid map actual correspondiente a la última lectura en el tiempo  $t$ .

En la parte inferior de la imagen, podemos ver la imagen asociada a la secuencia leída y la ventana de detección de movimiento.

A continuación presentaremos los resultados obtenidos tras la realización del proyecto.

En primer lugar, mostraremos la representación de puntos en el eje de coordenadas  $xy$  de una secuencia grabada.

Posteriormente se mostrarán los grid maps actual e histórico de una secuencia.

Y finalmente, se mostrarán capturas de la aplicación en tiempo de ejecución, correspondientes a varias secuencias tomadas por el telémetro láser. En dichas capturas, se mostrará la imagen captada por una cámara en la grabación de la secuencia, el grid map actual y el mapa de detección de movimiento.

## 6.1. REPRESENTACIÓN DE PUNTOS EN EL EJE DE COORDENADAS XY

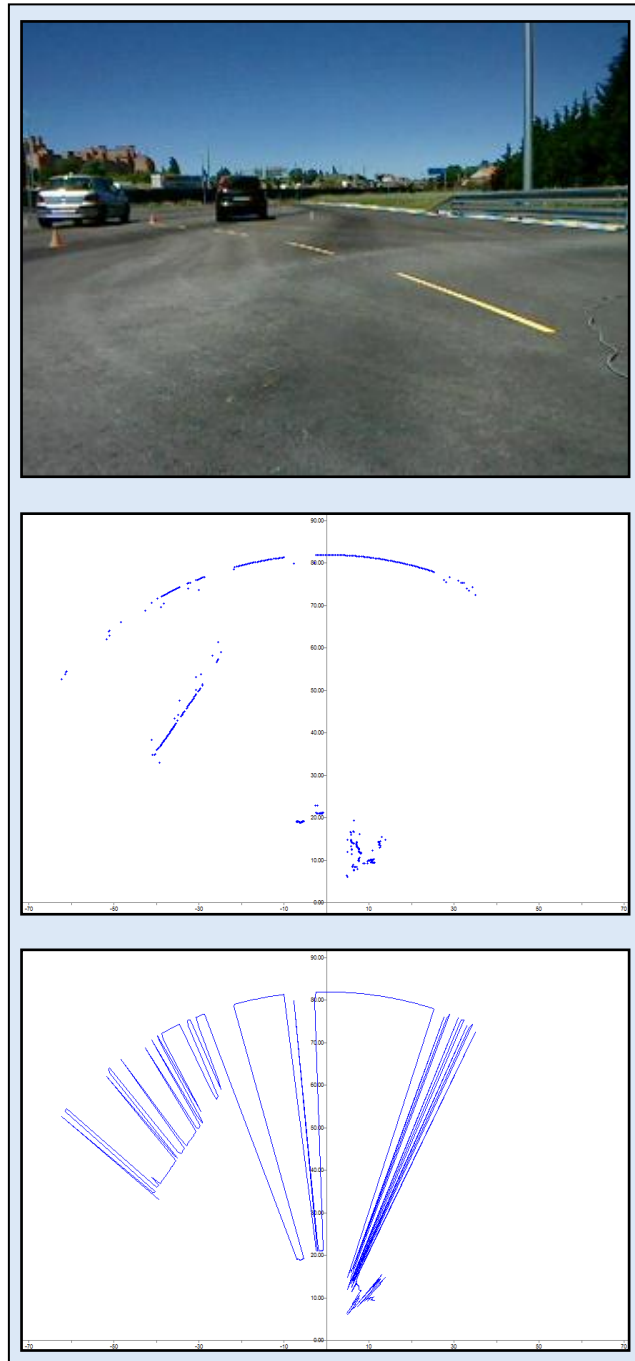
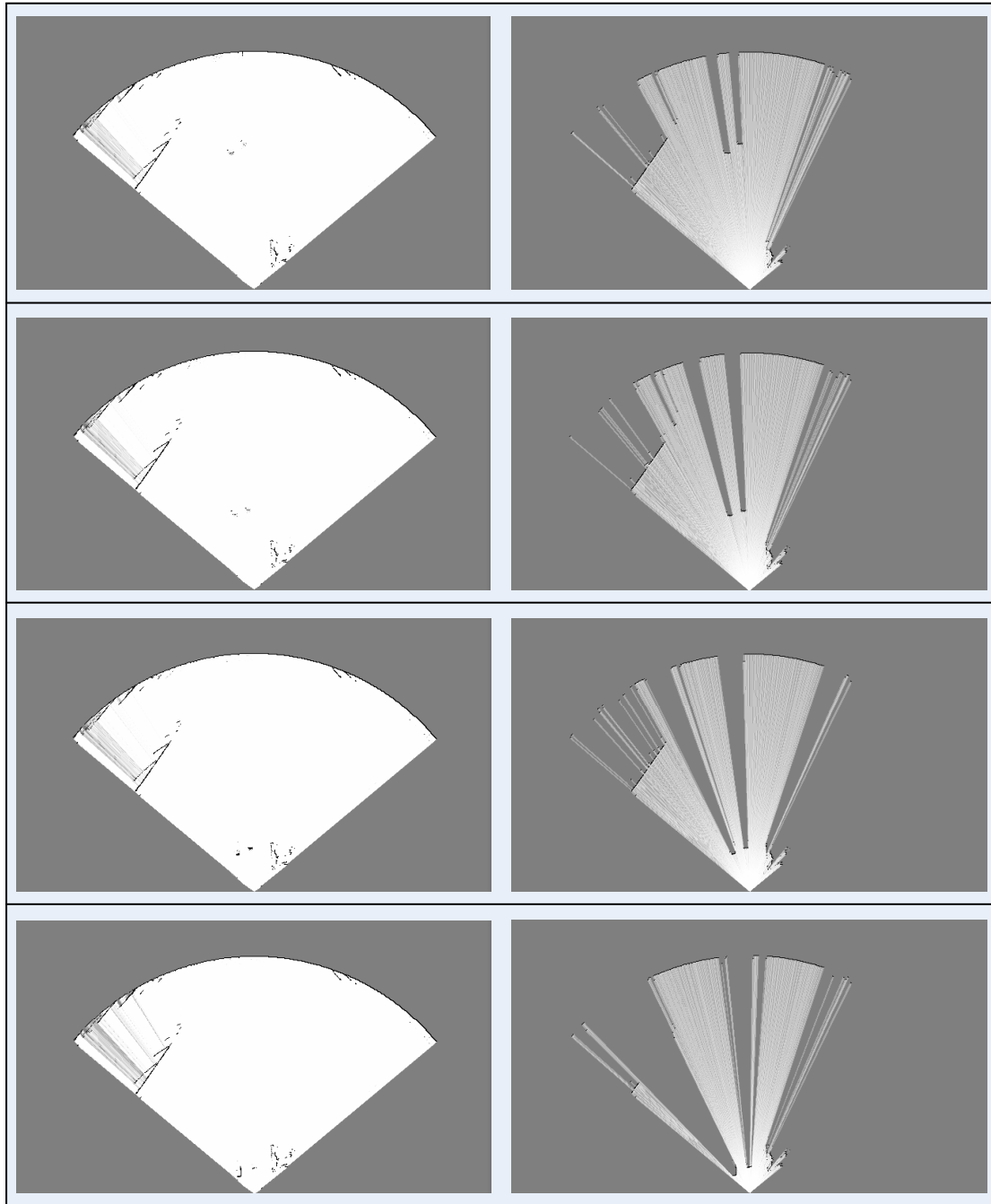


Ilustración 38. Ejemplos de puntos representados en ejes XY.

## 6.2. REJILLAS DE OCUPACIÓN: GRID MAPS HISTÓRICO Y ACTUAL



**Ilustración 39. Representación de grid maps histórico y actual.**

De abajo a arriba y de izquierda a derecha, se muestran los grid maps históricos y actuales, de cuatro lecturas de una secuencia correspondiente al alejamiento de dos coches circulando en paralelo.

A la izquierda de la imagen podemos observar el grid map histórico. A la derecha, por su parte, vemos el grid map actual de la última lectura del telémetro láser.

### 6.3. MAPA DETECCIÓN DE MOVIMIENTO

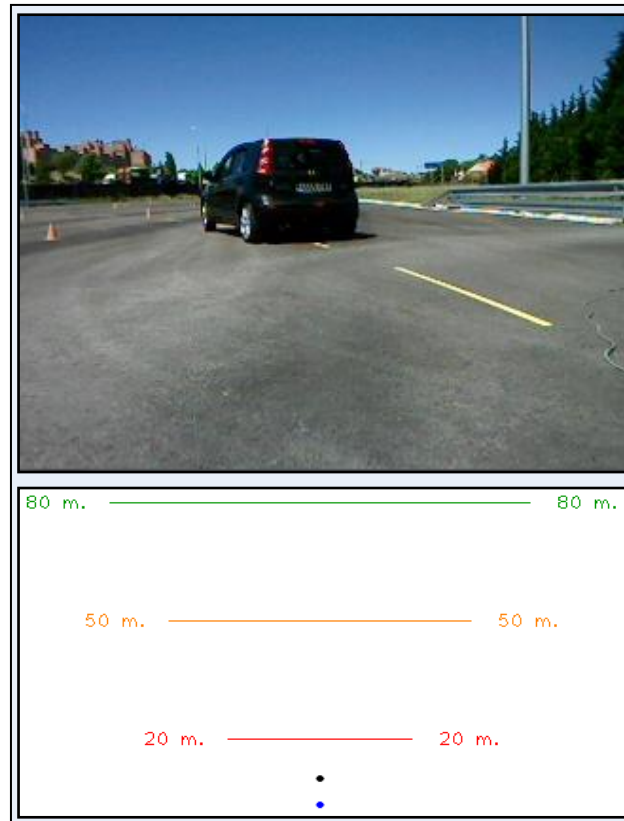


Ilustración 40. Representación de detección de movimiento (i).

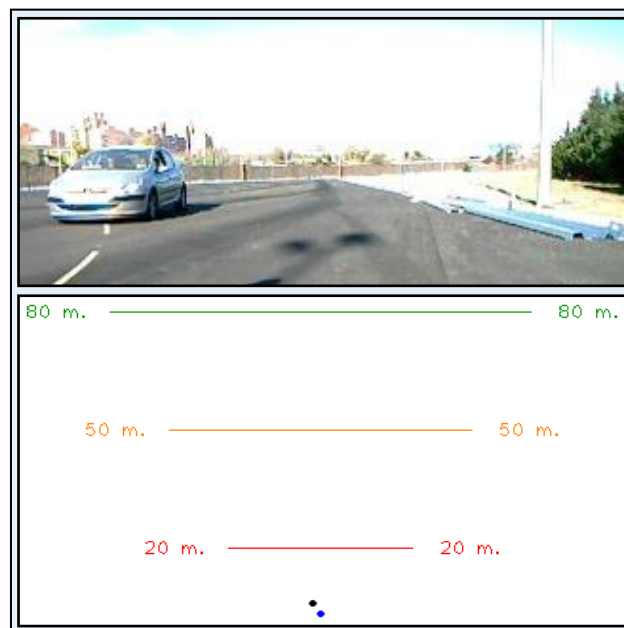


Ilustración 41. Representación de detección de movimiento (ii).



Ilustración 42. Representación de detección de movimiento (iii).

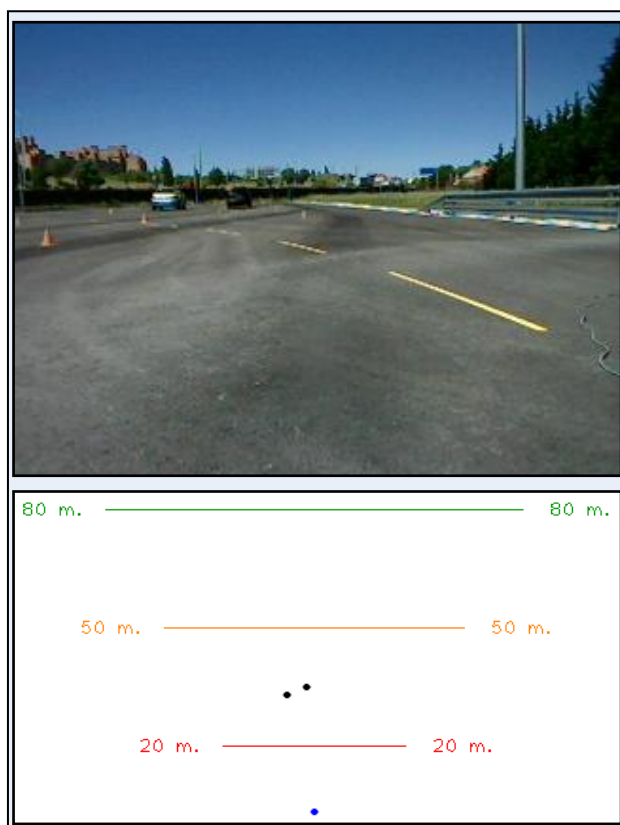


Ilustración 43. Representación de detección de movimiento (iv).

## 6.4. SECUENCIAS GRABADAS: CIRCUITO DE PRUEBAS INSIA

### 6.4.1. SECUENCIA I9: APROXIMACIÓN FRONTAL DE UN VEHÍCULO

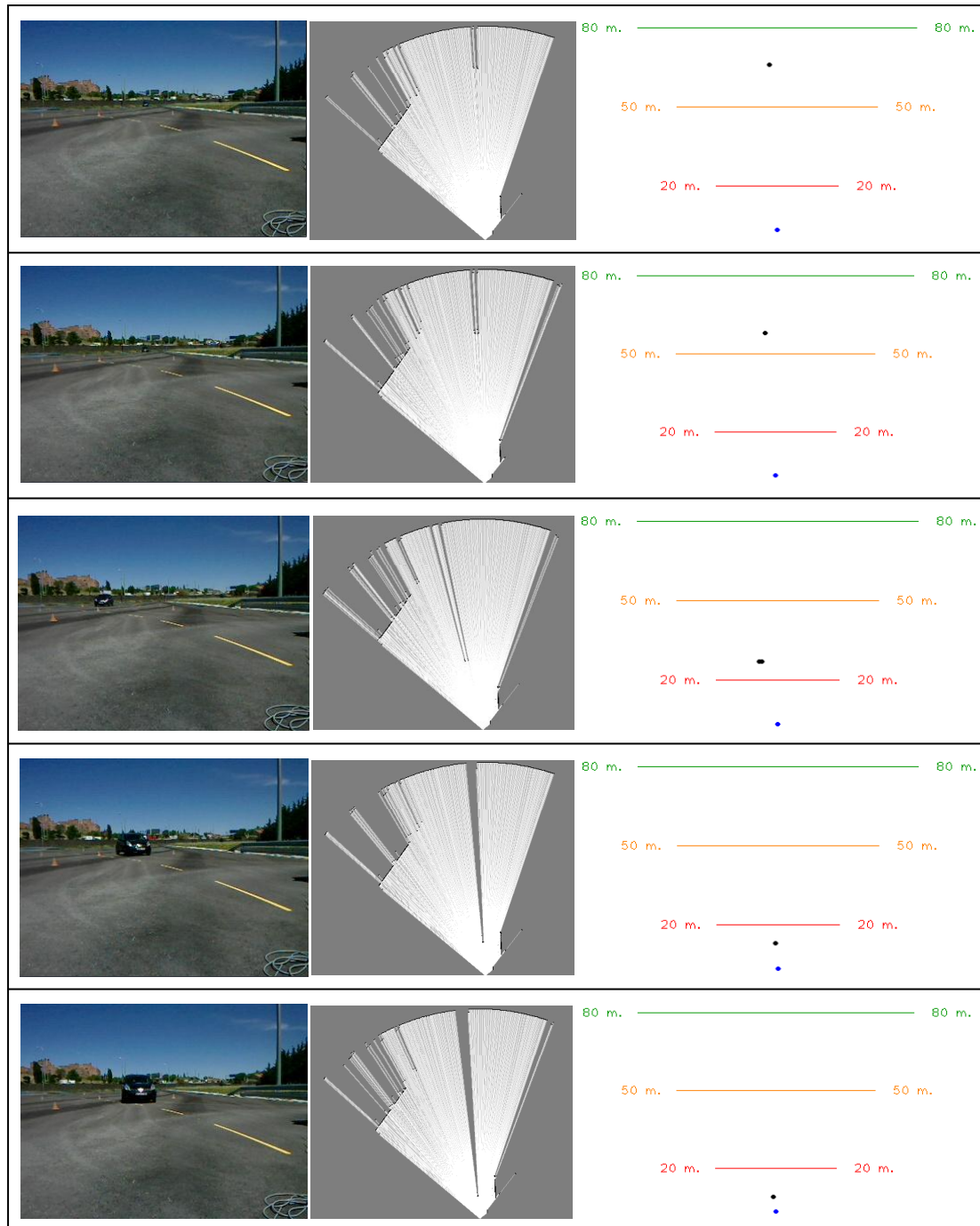


Ilustración 44. Ejemplo Secuencia i9 [Aproximación frontal de un vehículo].



## 6.4.2. SECUENCIA I21: DOS VEHÍCULOS CIRCULANDO EN SENTIDOS OPUESTOS

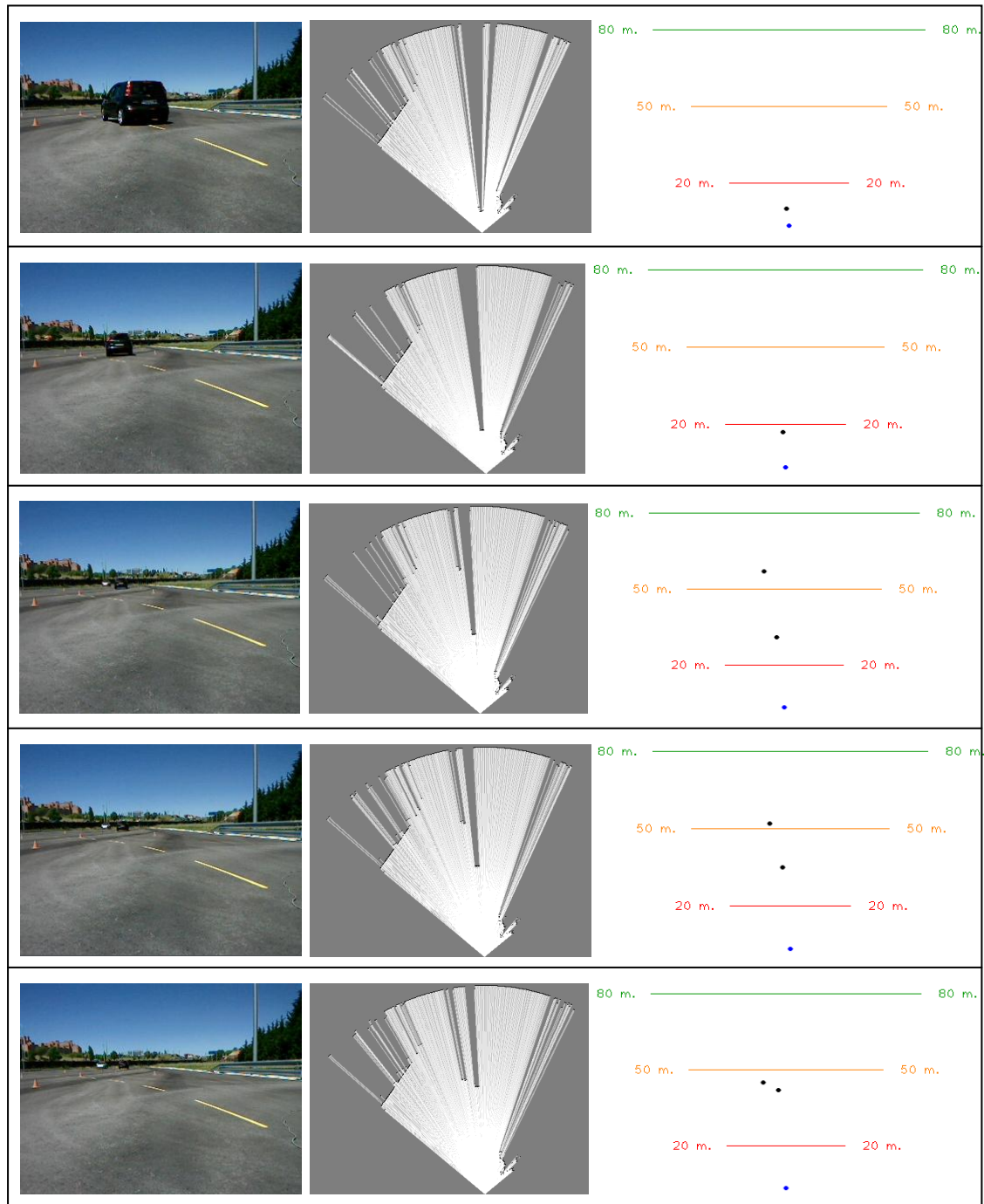


Ilustración 45. Ejemplo.A. Secuencia i21 [Dos vehículos circulando en sentidos opuestos].

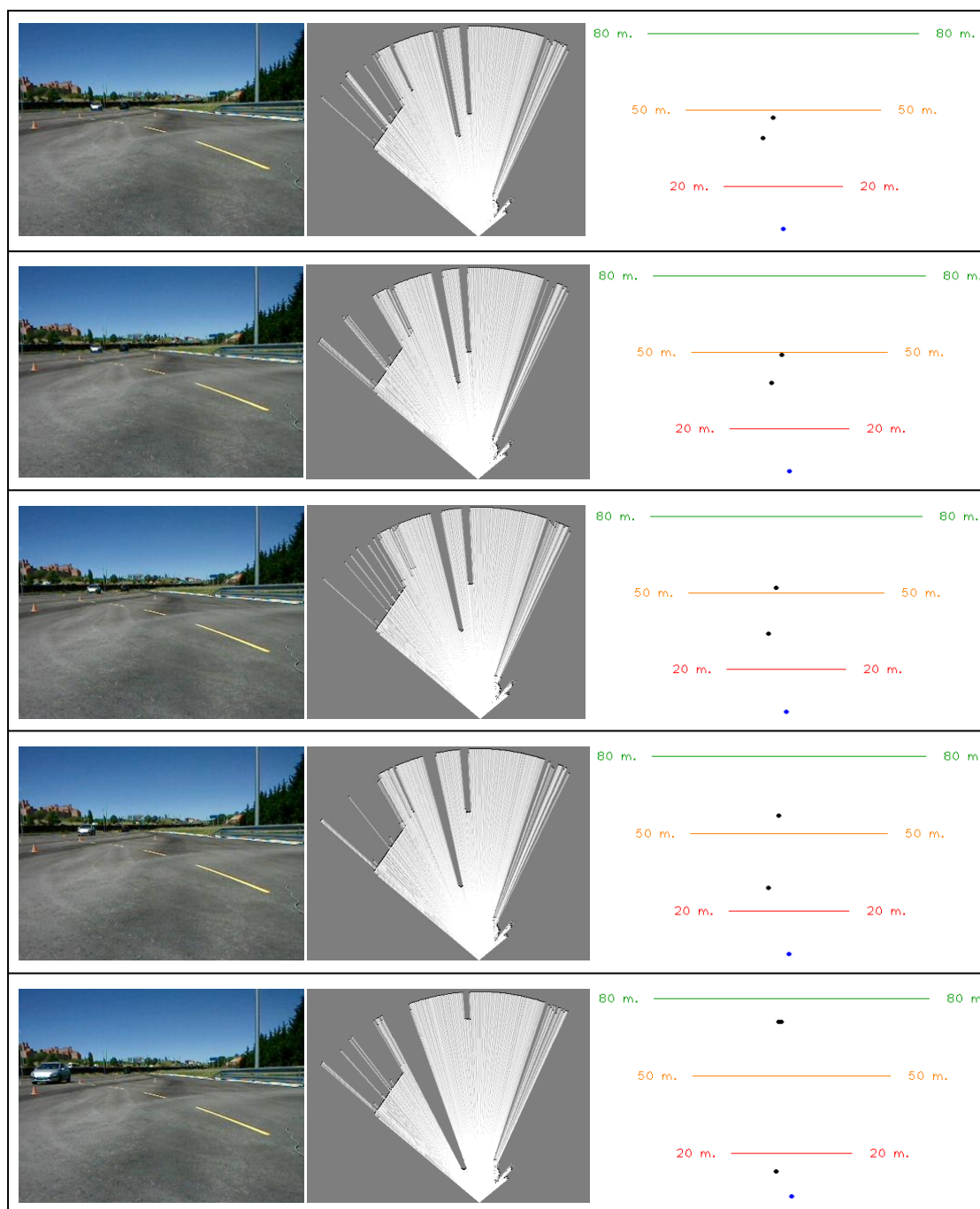


Ilustración 46. Ejemplo.B. Secuencia i21 [Dos vehículos circulando en sentidos opuestos].

### 6.4.3. SECUENCIA I21: TRAYECTORIA SEGUIDA POR AMBOS VEHÍCULOS

La siguiente ilustración muestra la trayectoria seguida por dos vehículos.

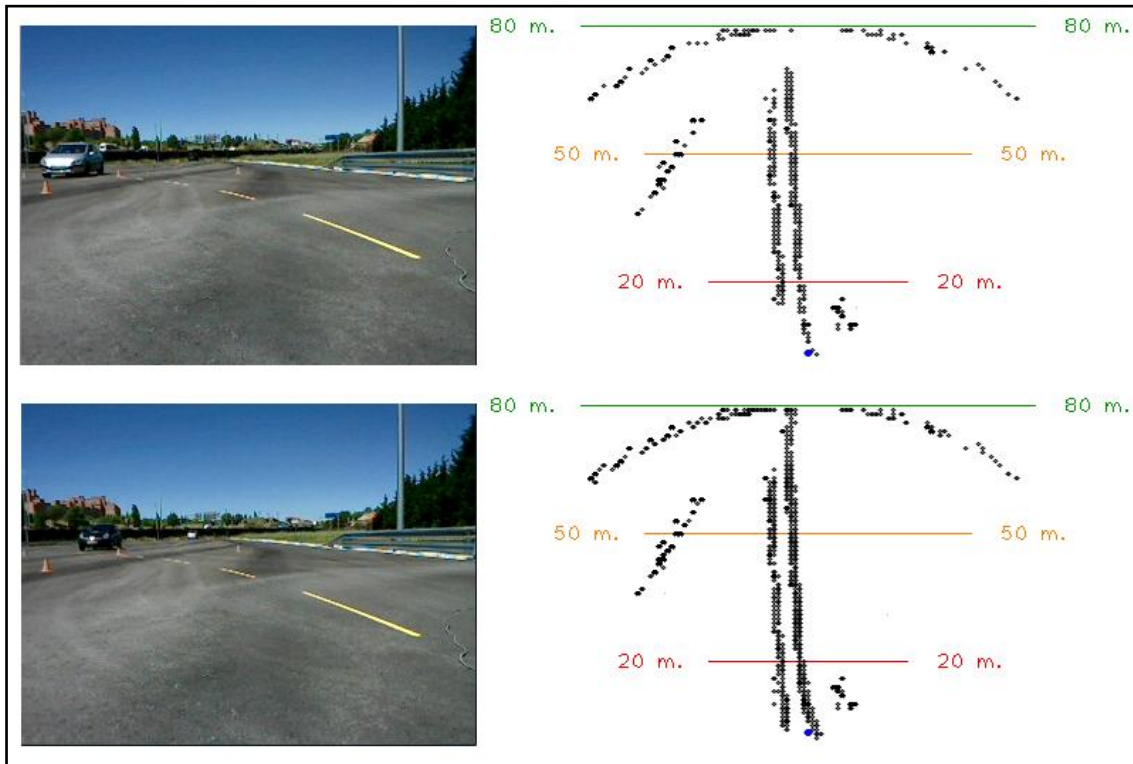


Ilustración 47. Trayectoria de ambos vehículos.

En la parte superior se observa el acercamiento del vehículo gris y el alejamiento del vehículo negro. En la parte inferior, el vehículo negro se acerca y el gris se aleja.

A la izquierda de la imagen podemos observar la imagen correspondiente tomada por la cámara. A la derecha, se aprecia la trayectoria seguida por ambos vehículos en la secuencia i21 mostrada en el apartado anterior (píxeles centrales de la imagen). En este caso, se representan todos los puntos detectados como movimiento haciendo uso del algoritmo creado para ello y explicado en el capítulo anterior.

#### 6.4.4. SECUENCIA I23: DOS VEHÍCULOS CIRCULANDO EN PARALELO

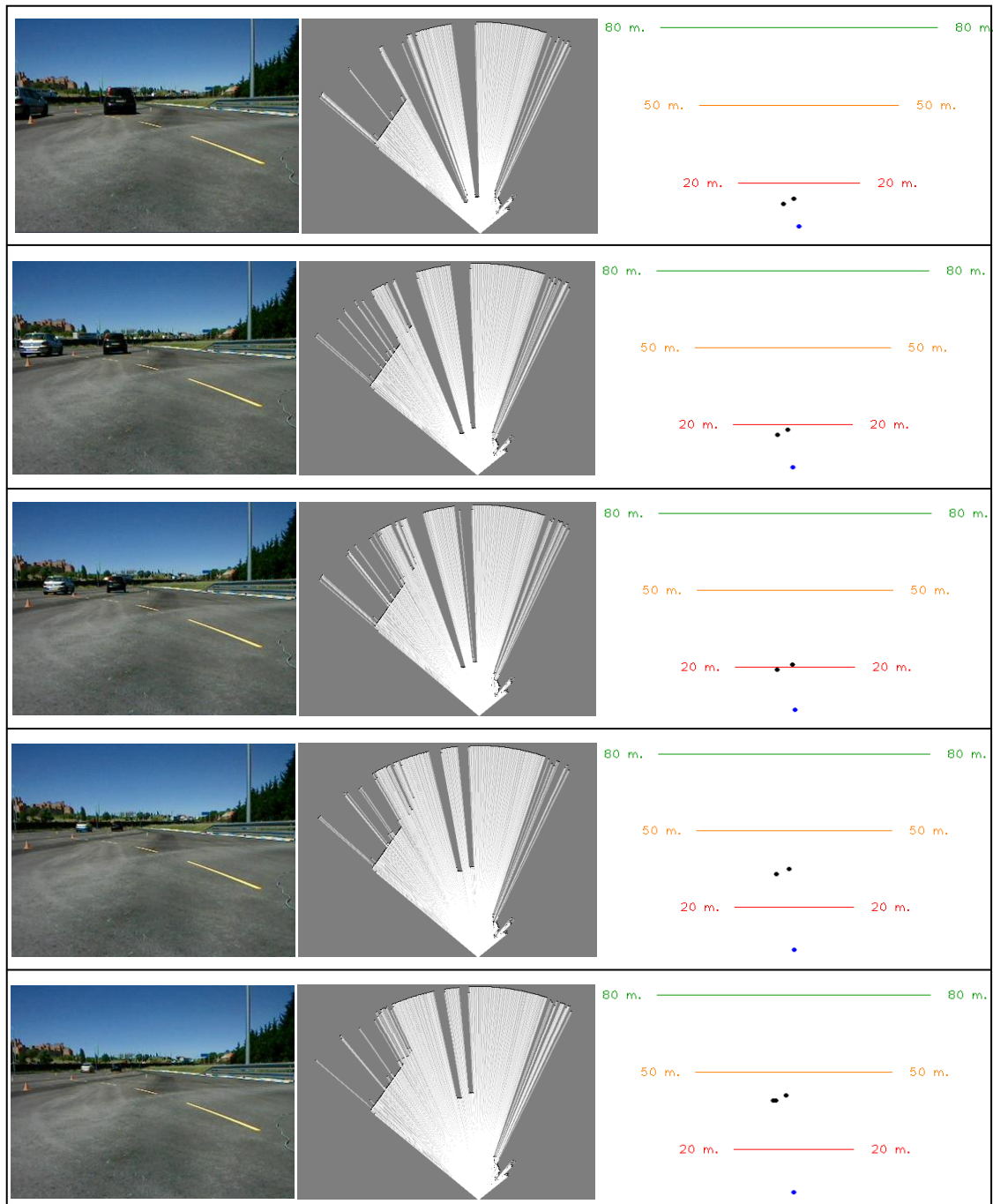


Ilustración 48. Ejemplo.A. Secuencia i23 [Dos vehículos circulando en paralelo].

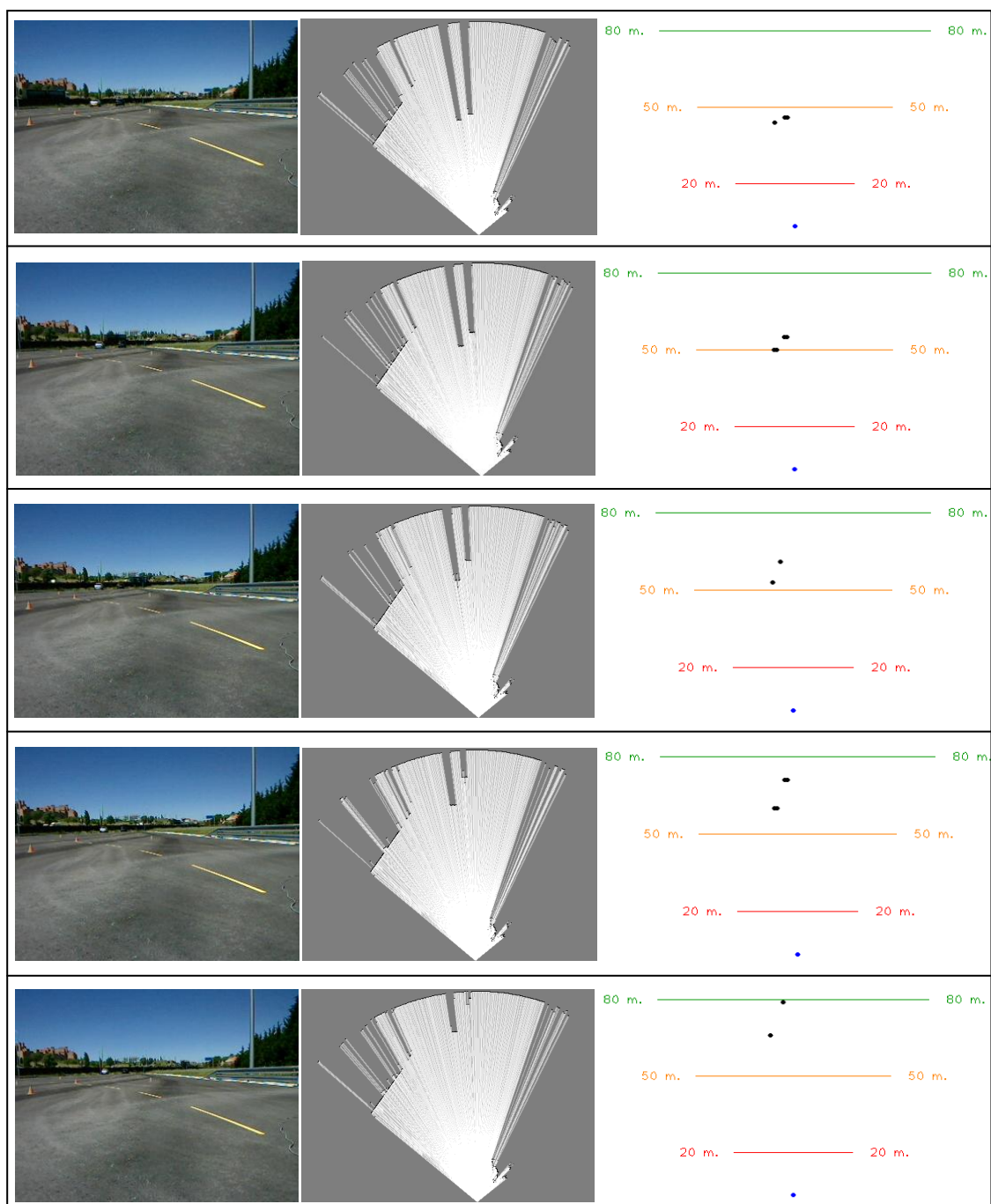


Ilustración 49. Ejemplo.B. Secuencia i23 [Dos vehículos circulando en paralelo].



#### 6.4.5. SECUENCIA I25: ADELANTAMIENTO ENTRE VEHÍCULOS

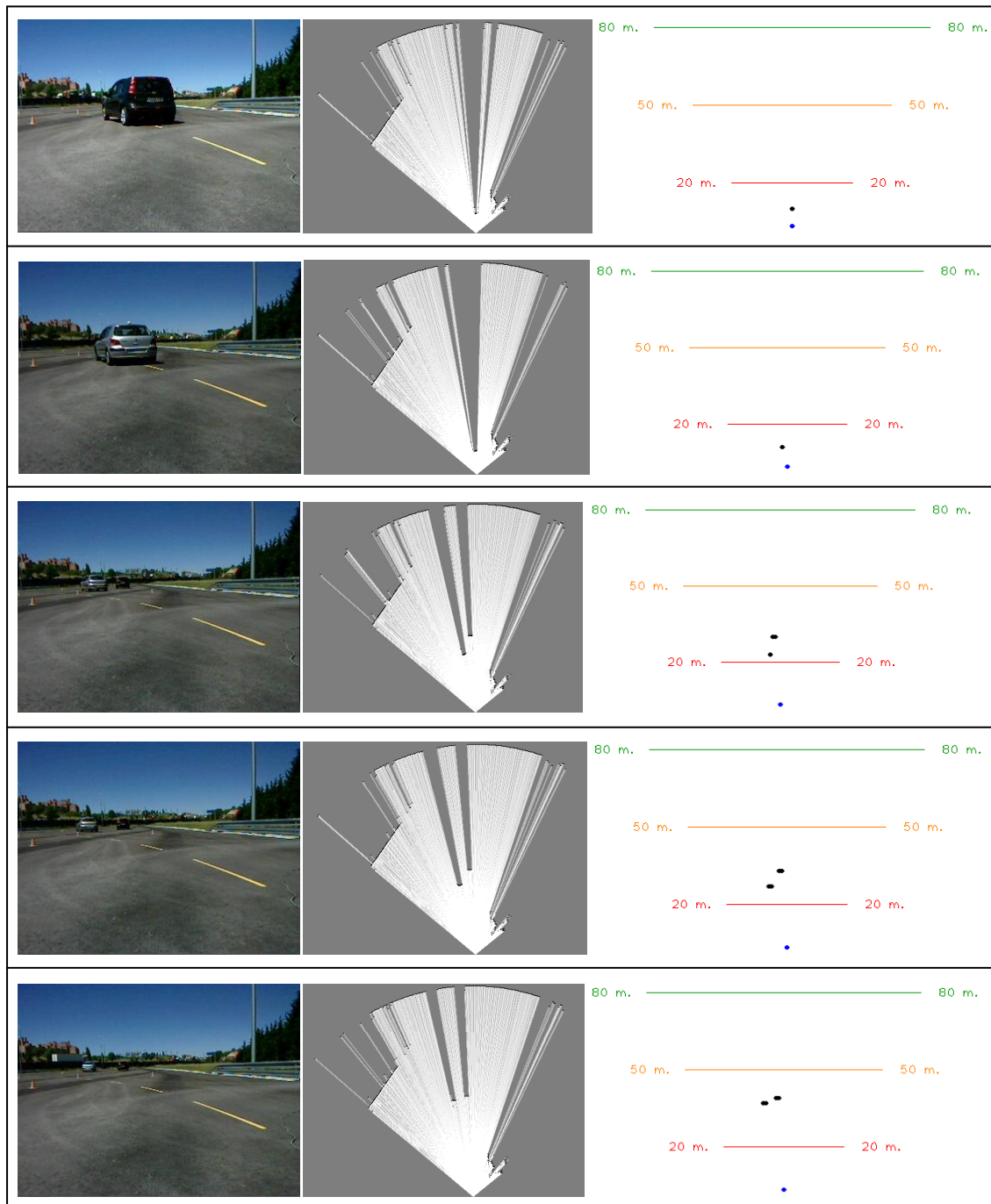


Ilustración 50. Ejemplo.A. Secuencia i25 [Adelantamiento entre vehículos].

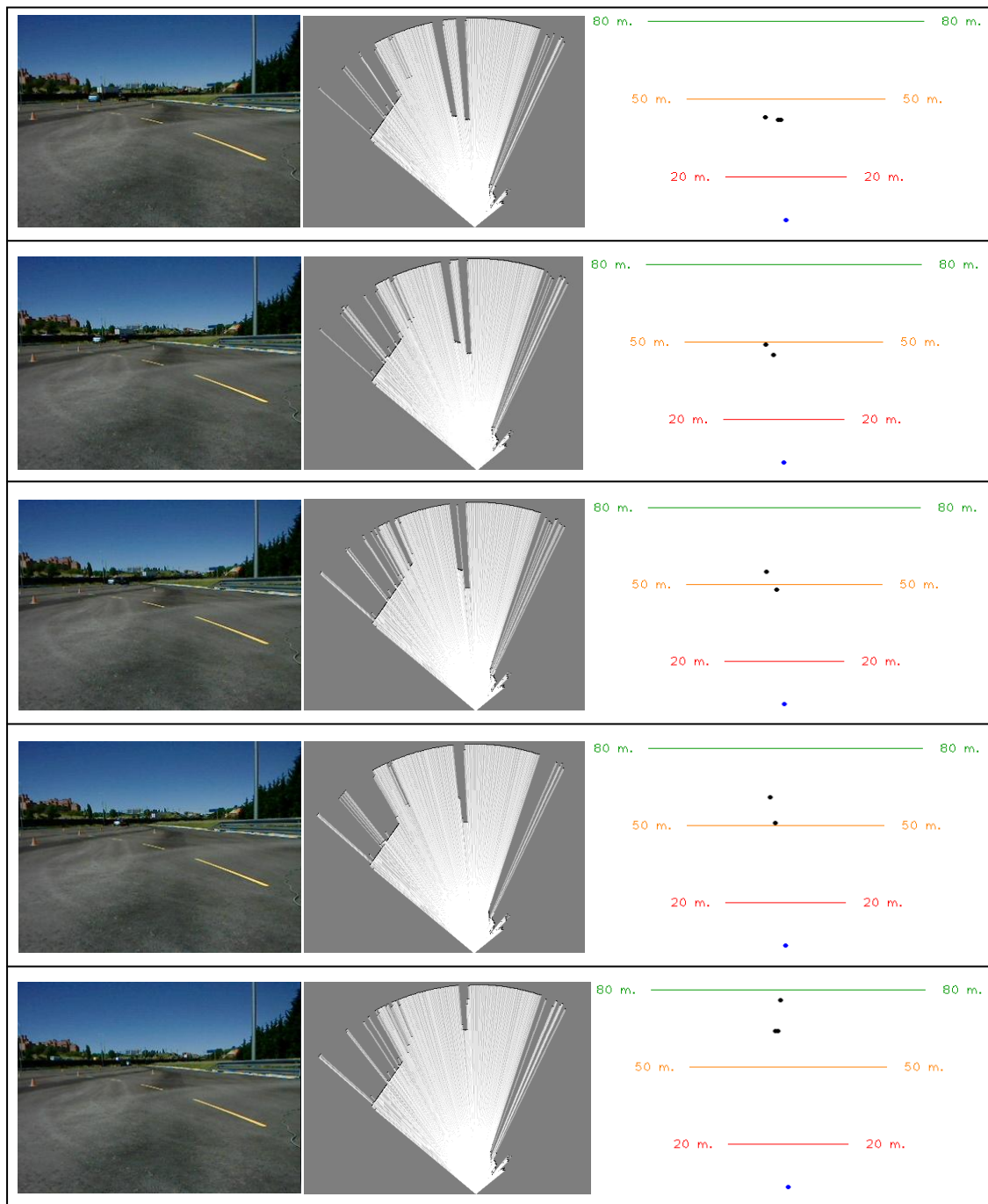


Ilustración 51. Ejemplo.B. Secuencia i25 [Adelantamiento entre vehículos].

#### 6.4.6. SECUENCIA M42: APROXIMACIÓN FRONTO-LATERAL DE UN VEHÍCULO

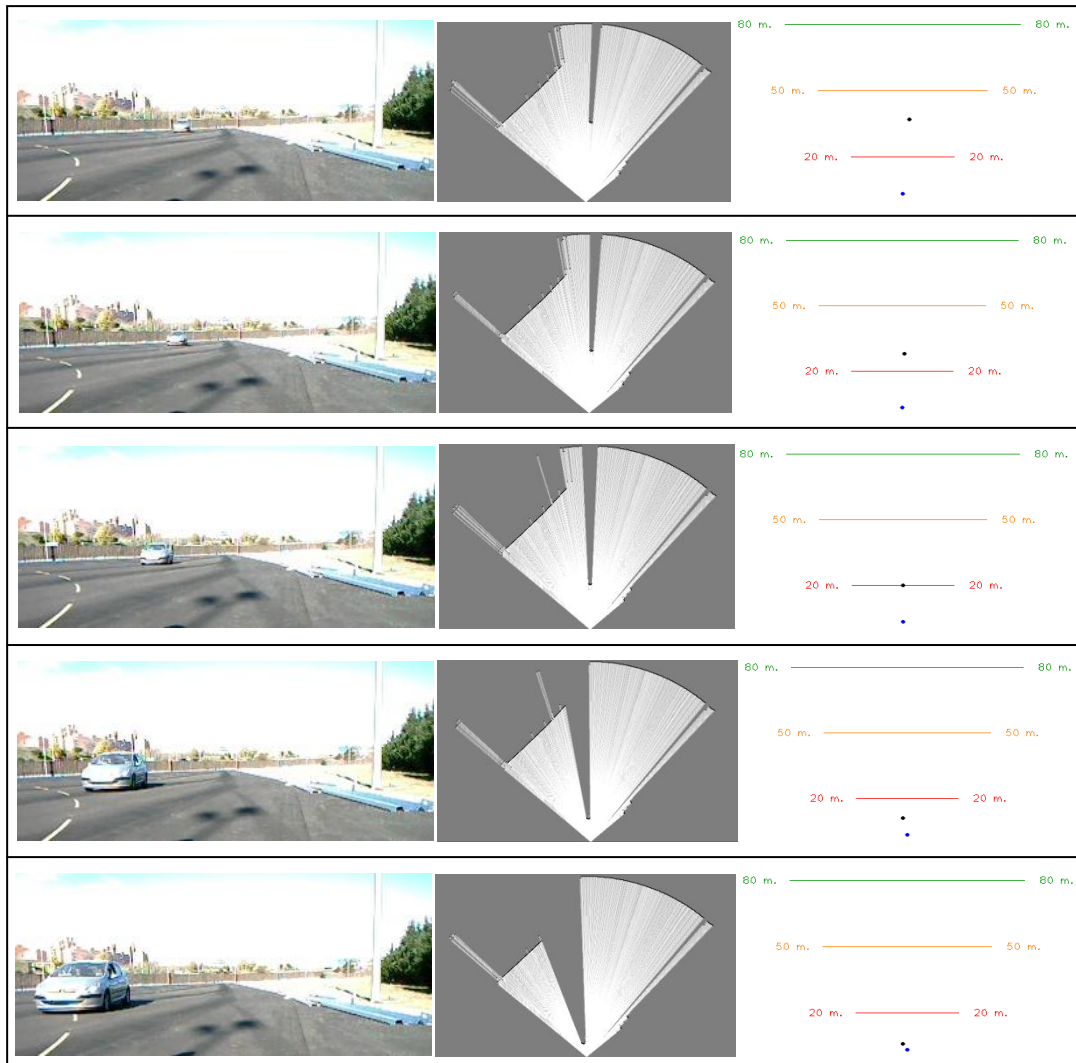


Ilustración 52. Ejemplo Secuencia m42 [Aproximación fronto-lateral de un vehículo].



## 6.5. RESULTADOS OBTENIDOS EN TIEMPO REAL

### 6.5.1. CAPTURA EN TIEMPO DE EJECUCIÓN EN TIEMPO REAL

La siguiente ilustración muestra una captura en tiempo de ejecución de una prueba realizada en tiempo real con el telémetro láser.

En ella, podemos observar los grid maps del entorno, tanto el histórico como el actual, un terminal donde se muestran las coordenadas donde se ha detectado movimiento, una ventana correspondiente a la representación del movimiento detectado y una imagen del entorno.

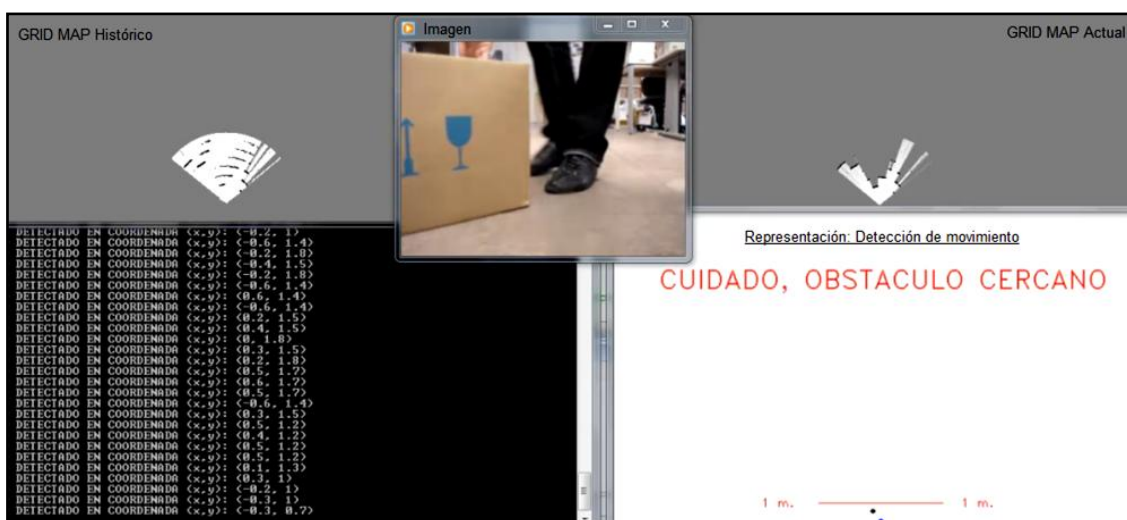


Ilustración 53. Captura en tiempo de ejecución (pruebas en tiempo real).

### 6.5.2. SECUENCIA GRABADA EN TIEMPO REAL

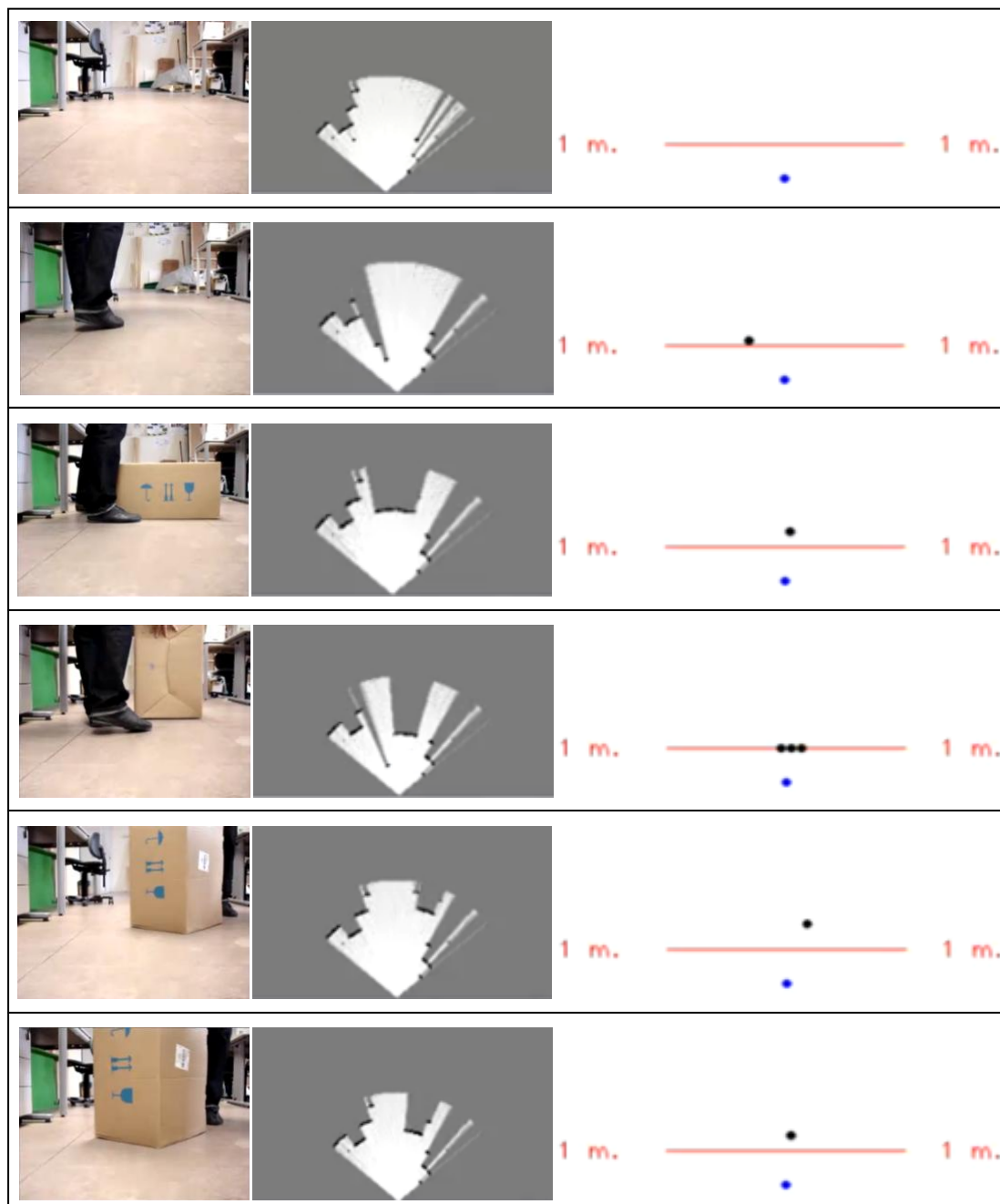


Ilustración 54. Ejemplo prueba realizada en tiempo real.

## 6.6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Tras las pruebas realizadas podemos llegar al siguiente resultado:

Los grid maps representados se corresponden totalmente con el entorno del telémetro láser, obteniendo así, un resultado satisfactorio. En ellos, se pueden apreciar claramente las zonas libres, ocupadas y desconocidas (ocultas) del entorno. Además, se puede conocer la probabilidad de ocupación de cualquier celda o coordenada.

En cuanto a la detección de movimiento, si hacemos un análisis de las coordenadas en las que se debe detectar movimiento sabiendo que realmente existe algún obstáculo moviéndose, observamos que en un 85% de los casos detectamos satisfactoriamente movimiento, mientras que en el 15% no se detecta. Cabe destacar que no se está haciendo un algoritmo de seguimiento del obstáculo, sino una detección de movimiento comparando ambos grid maps (histórico y actual) en un instante de tiempo  $t$ , observando así, en qué coordenadas se ha producido un cambio en la probabilidad de ocupación, como hemos comentado en el capítulo anterior.

# **Capítulo 7.**

# **Presupuesto**

## 7. PRESUPUESTO

### 7.1. COSTE DE MATERIAL

CONCEPTO	COSTE UNITARIO	CANTIDAD	IMPORTE
Telómetro láser SICK LMS291-S05	3500 €/u.	1 u.	3500 €
PC Toshiba A660-13Q Intel i5	815 €/u.	1 u.	815 €
Microsoft Visual Studio 2008	259 €/u.	1 u.	259 €
Conversor serie USB	60 €/u.	1 u.	60 €
<b>TOTAL</b>			<b>4634 €</b>

Tabla 16. Coste de material.

### 7.2. COSTE DE PERSONAL

CONCEPTO	COSTE UNITARIO	CANTIDAD	IMPORTE
Ingeniero Técnico Industrial	1750 €/mes	10 meses	17500 €
<b>TOTAL</b>			<b>17500 €</b>

Tabla 17. Coste de personal.

### 7.3. PRESUPUESTO TOTAL

CONCEPTO	IMPORTE
Coste de material	4634 €
Coste de personal	17500 €
<b>TOTAL</b>	<b>22134 €</b>

Tabla 18. Presupuesto total.

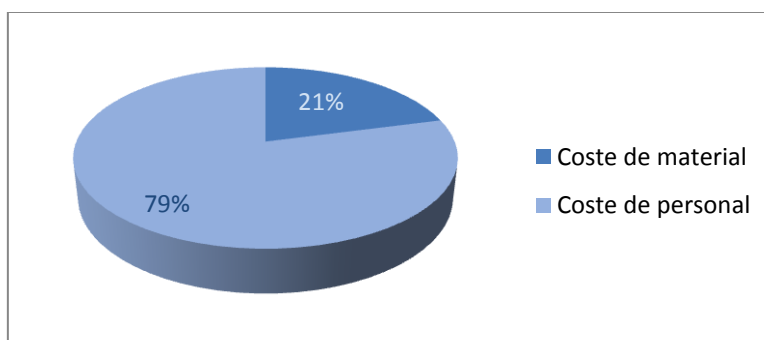


Ilustración 55. Gráfico presupuesto final.

El presupuesto final del presente proyecto, asciende a la cantidad de VEINTIDOS MIL CIENTO TREINTA CUATRO EUROS.

# **Capítulo 8.**

# **Conclusiones y trabajos futuros**

## 8. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este capítulo se presentarán las conclusiones generales obtenidas tras el desarrollo del proyecto y la realización de las pruebas, así como las futuras líneas de trabajo orientadas a mejorar y ampliar las prestaciones desarrolladas hasta el momento.

### 8.1. CONCLUSIONES

El presente proyecto se ha centrado en desarrollar un sistema que permita representar el entorno de un vehículo equipado con un telémetro láser usando el tipo de mapeado: rejillas de ocupación.

Para ello ha sido fundamental trabajar con la librería de robótica MRPT desarrollada en C++. Esta librería nos ha permitido representar el entorno mediante grid maps y acceder a las probabilidades de ocupación del mapa representado.

Además, se han dado los primeros pasos en la detección de obstáculos en movimiento, basándonos en los grid maps obtenidos tras el mapeado del entorno. Tras el algoritmo creado, se han representado dichos obstáculos en una ventana gráfica, haciendo uso de la librería de visión por computador openCV.

Los resultados obtenidos han sido satisfactorios, ya que se han logrado los objetivos del presente proyecto. Se ha conseguido modelar el entorno usando el método de mapeado: rejillas de ocupación. También se ha logrado realizar un primer algoritmo para detectar obstáculos en movimiento, basándonos en los mapas del entorno representados mediante rejillas de ocupación.

A continuación se trazarán las posibles líneas futuras de investigación.

### 8.2. TRABAJOS FUTUROS

Entre las mejoras relacionadas con el presente desarrollo, cabría destacar:

- Establecer una nueva comunicación con el telémetro láser modelo SICK LD-MRS400001, (adquirido recientemente por la Universidad Carlos III de Madrid), usando para ello la librería MRPT usada en el presente proyecto.
- Incorporar el GPS a la aplicación, obteniendo así una aplicación SLAM (*Simultaneous Localization And Mapping*), que nos permita actualizar el mapa en movimiento.
- Clasificar los obstáculos que aparecen en el grid map histórico, analizando la forma del obstáculo en base a las celdas o coordenadas ocupadas.
- Mejorar el algoritmo de detección de movimiento, fusionando los datos obtenidos del mapa de rejillas con los datos de otros sensores.

# **Capítulo 9.**

# **Bibliografía**



## 9. BIBLIOGRAFÍA

[Calz] web:

<http://mejorporlcalzada.blogspot.com/2011/12/estrategia-20303020-o-por-que-no.html>

*Último acceso: 20/02/2012*

[Caste02] Tesis Doctoral: Modelado de zonas cruzables en entornos exteriores para robots móviles. Cristina Castejón. 2002.

[Consu] web:

[http://www.consumer.es/web/es/motor/compra\\_coche/2005/02/28/117495.php](http://www.consumer.es/web/es/motor/compra_coche/2005/02/28/117495.php)

*Último acceso: 20/02/2012*

[DGTest] web:

[http://www.dgt.es/portal/es/seguridad\\_vial/estadistica/parque\\_vehiculos/series\\_historicas\\_parque/](http://www.dgt.es/portal/es/seguridad_vial/estadistica/parque_vehiculos/series_historicas_parque/)

*Último acceso: 20/02/2012*

[EcEuro] web:

[http://ec.europa.eu/information\\_society/activities/intelligentcar/technologies/das/index\\_es.htm](http://ec.europa.eu/information_society/activities/intelligentcar/technologies/das/index_es.htm)

*Último acceso: 21/12/2011*

[Elfes89] 'Using Occupancy Grids for Mobile Robot Perception and Navigation'. A.Elfes. Carnegie Mellon University. 1989.

[ElfMat] 'Integration of sonar and stereo range data using a grid-based representation'. A.Elfes y L.Matthies. 1988.

[Gallar99] Tesis Doctoral: Estrategias para localización y estimación de mapas de entorno. D.Gallardo. Universidad de Alicante. 1999.

[Gar09] 'Vehicle detection based on laser radar'. Fernando García, Pietro Cerri, Alberto Broggi, José María Armingol y Arturo de la Escalera. Universidad Carlos III de Madrid. Universit degli Studi di Parma. 2009.

[Intell] 'Intelligent Car Brochure' web:

[http://ec.europa.eu/information\\_society/activities/policy\\_link/brochures/documents/intelligent\\_car.pdf](http://ec.europa.eu/information_society/activities/policy_link/brochures/documents/intelligent_car.pdf)

*Último acceso: 21/12/2011*

[Kono] 'Improved occupancy grids for map building'. K.Konolige. 1997.

[LIDAR] web:

<http://en.wikipedia.org/wiki/File:LIDAR-scanned-SICK-LMS-animation.gif>

*Último acceso: 20/02/2012*

[LIDARgif] web:

<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c0/LIDAR-scanned-SICK-LMS-animation.gif>

*Último acceso: 20/02/2012*

[Martín] Curso de Doctorado: Algoritmos de construcción de mapas para la navegación de robots, basada en información procedente de sensores ultrasonidos. M.Martínez. Universidad Politécnica de Valencia.

[Mora09] Proyecto Fin de Carrera: Diseño del Sistema de Guiado de un Automóvil Autónomo. G.Morales. Universidad Carlos III de Madrid. 2009.

[MorElf] 'High resolution maps from wide angle sonar'. H.Moravec y A.Elfes. 1985.

[Occup] 'Occupancy Grid Mapping: An Empirical Evaluation'. T.Collins, J.Collins y C.Ryan. 2007.

[REDCOM] web:

[http://www.meilhaus.de/produkte/interfaces-datenuebertragung/?user\\_produkte%5BPR%5D=132&cHash=ecac44665b](http://www.meilhaus.de/produkte/interfaces-datenuebertragung/?user_produkte%5BPR%5D=132&cHash=ecac44665b)

*Último acceso: 20/02/2012*

[ReqMRPT] web:

[http://www.mrpt.org/Building\\_and\\_Installing\\_Instructions](http://www.mrpt.org/Building_and_Installing_Instructions)

*Último acceso: 20/02/2012*

[SICK] webs:

<https://www.mysick.com/saqqara/get.aspx?id=im0012759>

<http://www.sick-automation.ru/images/File/pdf/LMS%20Technical%20Description.pdf>

*Último acceso: 20/02/2012*

[Thrun01] 'Learning Occupancy Grid Maps With Forward Sensor Models'. S.Thrun. 2001.

[Thrun02] 'Probabilistic Robotics'. S.Thrun, W.Burgard, D.Fox. 2000.



# Anexos

## I. MAPEADO MEDIANTE REJILLAS O CELDAS DE OCUPACIÓN

### a. BASE TEÓRICA

La regla de oro de cualquier algoritmo basado en rejillas de ocupación es calcular el mapa basándose en las lecturas procedentes del sensor. Los algoritmos de mapeado calculan una función de densidad de probabilidad en función de los datos obtenidos [Thrun01] [Thrun02]:

$$p(m|z_{1:t}, x_{1:t})$$

Donde  $m$  representa el mapa,  $z_{1:t}$  el conjunto de todas las medidas realizadas hasta el instante  $t$  (delimitado por los límites del sensor, correspondiendo a aquellas posiciones dentro del ángulo de medida del sensor) y  $x_{1:t}$  es el camino definido a través de la secuencia de todas las posiciones hasta dicho instante.

El mapeado por rejillas de ocupación, divide el mapa en múltiples celdas de forma que el mapa  $m$  se puede expresar como:

$$m = \{m_i\}$$

Donde  $m_i$  es la celda de índice  $i$ .

Cada celda  $m_i$  lleva asociado un valor probabilístico de ocupación, siendo '0' una celda libre y '1' una celda ocupada.

*Nota: En nuestra aplicación, debido al uso de la librería MRPT, estos valores probabilísticos de ocupación, se designan de forma contraria, es decir, '0' corresponde a celda ocupada y '1' corresponde a celda libre.*

Por lo tanto, la probabilidad de ocupación de una celda se puede expresar mediante:  $p(m_i = 1)$ , o simplemente como:  $p(m_i)$ .

El problema de calcular las probabilidades de un mapa completo  $m$  radica en las elevadas dimensiones que toma la función de densidad de probabilidad, relacionado directamente con el número de celdas que constituyen dicho mapa.

Así, para un número de celdas  $n$  del orden de miles de celdas, el número de mapas que pueden representar dicho escenario es de  $2^n$ , lo que hace inviable el cálculo de probabilidades a posteriori de cada uno de los mapas.

La solución reside en realizar una aproximación al problema global, dividiéndolo en un conjunto de problemas independientes para cada celda  $m_i$ , de forma que pueda calcularse la probabilidad a posteriori de cada una de ellas como:

$$p(m_i|z_{1:t}, x_{1:t})$$

Lo que reduce cada estimación a un problema binario con estado estático. De esta forma, se puede aproximar el mapa global a:

$$p(m|z_{1:t}, x_{1:t}) = p(m_i|z_{1:t}, x_{1:t})$$

La ocupación de cada celda  $i$  en el instante  $t$ , se puede modelar como el logaritmo de las probabilidades de la siguiente forma:

$$l_{t,i} = \log \frac{p(m_i|z_{1:t}, x_{1:t})}{1 - p(m_i|z_{1:t}, x_{1:t})}$$

La ventaja de usar logaritmos (log-odds) en el cálculo de probabilidades, es evitar las inestabilidades numéricas para probabilidades cercanas a cero o a uno, de forma que podemos obtener la probabilidad como:

$$p(m_i|z_{1:t}, x_{1:t}) = 1 - \frac{1}{1 + e^{l_{t,i}}}$$

El valor a priori de ocupación de celdas  $l_0$  toma un valor constante calculado como:

$$l_0 = \log \frac{p(m_i = 1)}{p(m_i = 0)} = \log \frac{p(m_i)}{1 - p(m_i)}$$

Además de los datos suministrados por los sensores, es necesario tener en cuenta la información que puede proporcionar el propio robot a la hora de tomar las decisiones de ocupación de las celdas. De esta forma, es necesario considerar que las posiciones adyacentes a donde se encuentra dicho móvil deben ser navegables, es decir, celdas libres; así como incluir el volumen del móvil a la hora de generar los mapas, sobre todo en entornos variables y donde existe alta densidad de obstáculos móviles.

**b. APRENDIZAJE INVERSO EN LOS MODELOS DE MEDIDA**

El algoritmo de mapeado mediante rejillas de ocupación emplea en su desarrollo modelos inversos de medida para el cálculo de  $p(m|z, x)$  [Thrun01] [Thrun02] [MRPT].

Esta probabilidad es denominada “inversa” debido a que realiza el análisis partiendo del efecto y llegando a las causas que lo generan: proporciona información del entorno a partir de las medidas obtenidas por el sensor de dicho entorno.

La cuestión que se plantea en este punto es cómo es posible obtener modelos inversos partiendo de los modelos de medida tradicionales. Pues, el primer paso para ello, nos lleva al desarrollo de la ecuación de probabilidades de Bayes:

$$p(m|x, z) = \frac{p(z|x, m) \cdot p(m|x)}{p(z|x)} = \eta \cdot p(z|x, m) \cdot p(m)$$

Se ha asumido que  $p(m|x) = p(m)$  o en otras palabras, que la posición del robot no aporta información extra sobre el mapa.

La ecuación anterior se modifica para obtener su equivalente específica para cada celda  $m_i$  que conforma el mapa  $m$ :

$$p(m_i|x, z) = \eta \cdot \sum_{m: m(i)=m_i} p(z|x, m) \cdot p(m)$$

Sin embargo, esta suma se hace inviable debido a la elevada dimensión del espacio de mapas, lo que lleva a realizar una aproximación mediante muestreo previo en el modelo de medida y posterior empleo de algoritmos de aprendizaje supervisado, como es el caso de los métodos de regresión o las redes neuronales.

El muestreo consiste en generar de forma aleatoria una serie de tripletas  $(x_t^{[k]}, z_t^{[k]}, m_i^{[k]})$  correspondientes a la  $k$ -ésima muestra tomada en una misma celda  $i$  y en un mismo instante de tiempo  $t$ .

$x_t^{[k]}$  y  $z_t^{[k]}$  corresponden respectivamente a la posición y a la medida tomadas para esa muestra  $k$ -ésima dentro de la celda correspondiente a  $m_i$  y  $m_i^k$  es el valor de ocupación correspondiente a la celda si tenemos en cuenta los dos valores anteriores.

**c. CRITERIO MAP (MAPEADO DE OCUPACIÓN MÁXIMA A POSTERIORI)**

Como se ha visto anteriormente, una de las premisas del algoritmo básico de mapeado mediante rejillas de ocupación parte de la hipótesis de independencia entre las celdas que dividen el espacio. Este hecho puede derivar en conflictos entre medidas consecutivas, cuando en una de ellas exista obstáculo para una determinada celda y en la siguiente no. Es preciso por ello introducir una serie de dependencias en el cono de medidas para celdas adyacentes, lo que será detallado a continuación [Thrun01] [Thrun02].

Dicha dependencia es tenida en cuenta mediante la maximización de la probabilidad de ocupación a posteriori en el modelo de mapa completo:

$$m^* = \operatorname{argmax} \log p(m|z_{1:t}, x_{1:t})$$

Donde  $m^*$  es el mapa estimado.

Aplicando la fórmula de Bayes, se puede desarrollar el modelo anterior de la siguiente manera:

$$\log p(m|z_{1:t}, x_{1:t}) = \log p(z_{1:t}|x_{1:t}, m) + \log p(m) + \text{valor constante}$$

Donde el primer sumando se puede descomponer como suma de las medidas individuales en cada instante de tiempo:

$$\log p(z_{1:t}|x_{1:t}, m) = \sum_t \log p(z_t|x_t, m)$$

Por su parte, el segundo término correspondiente a la probabilidad a priori de cualquier mapa  $m$ , se puede desarrollar como:

$$\begin{aligned} p(m) &= \prod_i p(m)^{m_i} \cdot (1 - p(m))^{1-m_i} = \\ &= (1 - p(m))^N \cdot \prod_i p(m)^{m_i} \cdot (1 - p(m))^{-m_i} = \eta \cdot \prod_i p(m)^{m_i} \cdot (1 - p(m))^{-m_i} \end{aligned}$$

Donde  $p(m)$  es la probabilidad a priori de ocupación de celdas (cuyo valor inicial generalmente suele ser 0,5),  $N$  el número total de celdas en el mapa y  $\eta$  es una constante tal que:  $\eta = (1 - p(m))^N$ .

Aplicando logaritmos a la fórmula anterior, se llega a:



$$\begin{aligned}\log p(m) &= \sum_i m_i \cdot \log p(m) - m_i \cdot \log p(1 - p(m)) + \text{constante} = \\ &= \sum_i m_i \cdot \log \frac{p(m)}{1 - p(m)} = \sum_i m_i \cdot l_0 + \text{constante}\end{aligned}$$

Aplicando los desarrollos anteriores a la fórmula inicial de maximización de las probabilidades a posteriori, se concluye que:

$$m^* = \operatorname{argmax}_t \sum \log p(z_t | x_t, m) + l_0 \cdot \sum_i m_i$$

## II. GUIA DE INSTALACIÓN DE LA LIBRERÍA DE ROBÓTICA: MRPT

A continuación se explica detalladamente la instalación de la librería MRPT.

### ❖ MRPT

1) Nos descargamos la librería MRPT: MRPT-0.9.3-win32-no-kinect.exe, de su propia página: [www.mrpt.org](http://www.mrpt.org)

2) Instalamos MRPT en C:\mrpt-0.9.3

### ❖ CMake

3) Nos descargamos CMake (herramienta multiplataforma de generación de código): cmake-2.8.4-win32-x86.exe, de su propia página: [www.cmake.org](http://www.cmake.org)

4) Instalamos CMake en C:\CMake 2.8

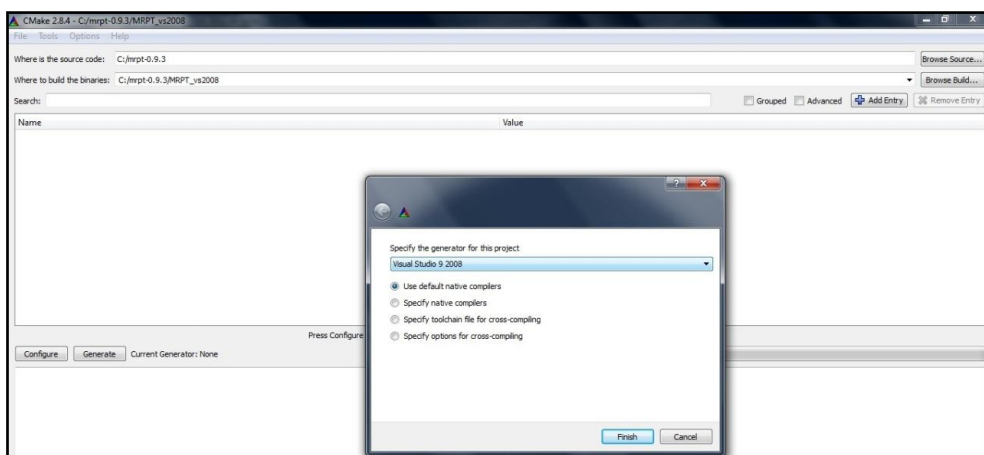
5) Ejecutamos CMake GUI.

6) En CMake GUI, en "Where is the source code", seleccionamos C:\mrpt-0.9.3

7) Nos creamos un directorio llamado MRPT\_VS2008 dentro de C:\mrpt-0.9.3

8) Volvemos a CMake GUI, y en "Where to build the binaries", seleccionamos el directorio anteriormente creado (C:\mrpt-0.9.3\MRPT\_VS2008)

9) Pulsamos Configurar y seleccionamos "Visual Studio 9 2008"





1. *Journal of the American Medical Association*, 1997; 278: 1019-1024.

Figure 1. The effect of the concentration of the *Agrobacterium* strain on the transformation efficiency of *Agrobacterium* strain.

Botón derecho sobre Mi Equipo -> Propiedades -> Configuración Avanzada del Sistema -> Opciones Avanzadas -> Variables de Entorno -> Variables del Sistema -> Path -> Editar

*Copiamos y pegamos lo siguiente:*

*;C:\mrpt-0.9.3\MRPT\_VS2008\bin\Debug;C:\mrpt-0.9.3\MRPT\_VS2008\bin\Release*

17) De nuevo en el Visual Studio, añadimos en: Tools->Options->Projects->VC++ Directories->Library files

C:\mrpt-0.9.3\MRPT\_VS2008\lib\Release

C:\mrpt-0.9.3\MRPT\_VS2008\lib\Debug

18) En Tools->Options->Projects->VC++ Directories->Include files

Añadimos:

C:\mrpt-0.9.3\include\MRPT

19) Al crearnos un proyecto nuevo en Visual Studio, seleccionar:

Tipo de proyecto: Win32

Plantillas: Aplicación de consola Win32

20) Ya podemos crearnos un programa usando la librería MRPT.

## III. HOJA DE CARACTERÍSTICAS: SICK LMS 291 S05 [SICK]

Function	Performance Characteristics	Remarks	Default setting
Monitoring fields, static	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rectangular</li> <li>Segmented (also teach-in)</li> </ul>		A, B, C segmented each 50 mm radial (indoor) each 5 cm radial (outdoor)
Number of field sets	2, each with 3 fields	Each with field A, B, C	
Switching field sets	With static signal via external switch ("Restart" input) or by telegram		
Switching outputs (OUT A, B, C)	3	PNP, normal potential typ. 24 V DC	
Switching outputs LMS 211/221-S07/-S20 alternative with relay contacts	2 (OUT A, OUT B)	OUT C as PNP	Normally closed when active (set by factory)
Subtractive fields	LMS2xx standard: 1 field LMS-211/221-S19/20: 2 fields	<ul style="list-style-type: none"> <li>Standard: monitored area = field A minus field B</li> <li>Special devices: monitored area 1 = field A minus field C monitored area 2 = field B minus field C</li> </ul>	No subtractive field
Field evaluation	<ul style="list-style-type: none"> <li>Scan-oriented (blanking possible)</li> <li>Pixel-oriented (blanking not possible)</li> <li>Contour as reference</li> </ul>		Pixel-oriented No blanking 2 scans multiple reading
Restart after field infringement (reset of switching outputs)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Direct restart, automatically</li> <li>Restart after defined delay, automatically</li> <li>Restart triggered manually by a button</li> </ul>	External button for restart. Restart of the several fields independent of each other	Automatically, direct after clearing the field
Temporary field set	Yes	Field set is defined online by external software (telegram)	
Measured value transfer in real-time (500 kBd, RS 422)	Yes	High Speed interface RS 422 on PC required	
Selectable baud rate: 9.6 kBd, 19.2 kBd, 38.4 kBd, 500 kBd	Yes	500 kBd required for real-time transfer	9.6 kBd Parity: none
Measurement range in mm Measurement range in cm	Up to 8 m/16 m/32 m Up to 80 m	Selectable range	mm (indoor use) cm (outdoor use)
Conversion of polar co-ordinates into Cartesian co-ordinates	Yes	Max. 200 measured values as Cartesian co-ordinates	Polar co-ordinates
Measured value flags	<ul style="list-style-type: none"> <li>Infringement of field A, B, C or</li> <li>Detection of reflector or</li> <li>Dazzle, field A, B</li> </ul>	Data output supplementary information, e.g. for navigation using reflector marks	Field A, B; dazzle
Minimum perpendicular distance	Yes	Measured values for field A, B, C	
Measured value output	<ul style="list-style-type: none"> <li>All measured values of a scan</li> <li>Average measured values (up to 250 scans)</li> <li>Measured values for partitioned sector</li> <li>Average measured values for partitioned sector (up to 250 scans)</li> </ul>		Measured values on request

Ilustración 56. Características SICK LMS 291.

Type	Indoor: LMS200, Outdoor: LMS211, LMS221, LMS291
Scanning angle (field of vision)	100°/180° (type-dependent, see Table 11-1, Page 27)
Motor speed	75 Hz
Angular resolution (response time)	0.25° <sup>1)</sup> (53.33 ms); 0.5° (26.66 ms); 1° (13.33 ms); selectable
Range	Max. 80 m (type-dependent, see Table 11-2, Page 27)
Measurement resolution	10 mm
Measurement accuracy	typical ±35 mm (LMS200-30106, LMS211/LMS221-30106: typical ±15 mm)
Systematic error <sup>2)</sup>	LMS200-30106/LMS211-30106/LMS221-30106: - mm-mode: typical ±15 mm at range 1 to 8 m - cm-mode: typical ±4 cm at range 1 to 20 m LMS211/LMS211-30206/LMS291/LMS221-30106/LMS2x1-Sxx: - mm-mode: typical ±35 mm at range 1 to 20 m - cm-mode: typical ±5 cm at range 1 to 20 m
Statistical error <sup>3)</sup>	LMS200-30106/LMS211-30106/LMS221-30106: mm-mode: typical 5 mm at range ≤ 8 m/ reflectivity ≥ 10 %/ light ≤ 5 klx LMS211/LMS211-30206/LMS291/LMS221-30106/LMS2x1-Sxx: mm-mode: typical 10 mm at range 1 to 20 m/ reflectivity ≥ 10 %/ light ≤ 5 klx
Laser diode (wavelength)	Infra-red ( $\lambda = 905 \text{ nm}$ )
MTBF of LMS2xx <sup>4)</sup>	Indoor devices: 70,000 h Outdoor devices: 50,000 h
Laser class of device	Class 1 (eye-safe), to EN/IEC 60825-1 and to 21CFR 1040.10
Optical indicators	3 x LED (LMS200/LMS291 only)
Data interface	RS 232 or RS 422 (selectable in the connector plug)
Data transfer rate	RS 232: 9.6 / 19.2 kbd RS 422: 9.6 / 19.2 / 38.4 / 500 kbd
Data format	1 start bit, 8 data bits, 1 stop bit, no parity (fixed)
Switching inputs	All LMS2xx except LMS2xx-S14 (LMS Fast): 1 x ("Restart" or "Field set switching"), $U_{in} = 12 \text{ to } 24 \text{ V}$ , $I_{in} = 5 \text{ mA}$
Switching outputs (standard device)	LMS200/LMS291/LMS211/LMS221: 3 x PNP (OUT A to OUT C), high, typical 24 V DC ("field OK"), short-circuit-proof, selectable restart delay after field infringement (0; 100 ms to 255 s) - OUT A, OUT B (each max. 250 mA): "field infringement" - OUT C (max. 100 mA): "field infringement/error indication (Weak)" <sup>5)</sup>
<p>1) Angular resolution 0.25° not possible in the area monitoring mode</p> <p>2) Definition measurement accuracy:  <b>Resolution:</b>  The resolution of a measuring device is the smallest possible distance different from zero between two consecutive individual measurement values.  The resolution can be reduced by using averaged values.  <b>Systematic error:</b>  Environmental conditions: good visibility, <math>T_a = 23 \text{ °C}</math>, reflectivity 10 to 10,000 %.  The systematic error is the sum of all the deviations over a defined extent of range and reflectivity, which cannot be reduced even using averaged values.</p> <p>3) <b>Statistical error:</b>  Standard deviation 1 sigma. The standard deviation is calculated using at least 100 measuring values of a target (object) with a certain reflectivity at a certain distance with a certain amount of illumination.</p> <p>4) at <math>T_a = 25 \text{ °C}</math></p> <p>5) For indicating an error, the output pulses with 1 Hz/5 Hz and different pulse ratios depending on the error type, see Table 7-4, Page 21.  Special devices LMS211/221-S19/-S20: indication of front window contamination (warning/error) additionally via OUT C switching output by statical signal</p>	

Ilustración 57. Datos técnicos [I] SICK LMS 291.

Type	Indoor: LMS200, Outdoor: LMS211, LMS221, LMS291
Switching outputs (special devices)	LMS211/LMS221-S07/-S20: <ul style="list-style-type: none"> <li>2 x relay (OUT A, OUT B), contact closed (normal position): "field OK"  max. switching voltage 48 V DC/26 V AC (extra-low voltage, safe isolation from mains)  max. switching current 0.7 A, max. switching power 30 W</li> <li>1 x PNP (OUT C/Weak), High, typical 24 V DC, max. 100 mA, short-circuit-proof: "field infringement/error indication (Weak)"<sup>5)</sup></li> </ul> Restart delay after field infringement 0; 100 ms to 255 s (selectable)
Electrical connections	LMS200/LMS291: <ul style="list-style-type: none"> <li>1 x plug module plug with 9-pin D Sub socket (solder connection)</li> <li>1 x plug module with 9-pin D Sub plug (solder connection)</li> </ul> Each module plug with PG 9 cable gland for cable diameter 4 to 8 mm LMS211/LMS221: 1 x 16-pin plug (screw terminals) with 3 x PG 11 cable glands for cable diameter 5 to 12 mm
Operating voltage (according to IEC 364-4-41)	LMS electronics: 24 V DC $\pm$ 15 % (max. 500 mV ripple), current consumption max. 1.8 A (with output load) Heating (LMS211/LMS221): 24 V DC (max. 6 V ripple), current consumption max. 6 A (cyclic) Heating (LMS200/LMS291, via external heating plate (accessory)): 230 V AC $\pm$ 10 %, current consumption max. 2.5 A (cyclic)
Power consumption	Approx. 20 W (without load), additionally with heating: LMS211/LMS221 approx. 140 W LMS200/LMS291 approx. 30 W
Housing	LMS200/LMS291: Aluminium die-cast LMS211/LMS221: Aluminium die-cast (ground plate), PU (casing)
Enclosure rating (to DIN 40 050)	LMS200/LMS291: IP 65 LMS211/LMS221: IP 67
Protection class	Class 2 (to VDE 0106/IEC 1010-1), safety insulated
EMC test	to EN 61000-6-2, EN 61000-6-3/A11 (2004-07)
vibration test <sup>6)</sup>	to IEC 68 part 2-6, table 2c (Frequency range 10 to 150 Hz, amplitude 0.35 mm or 5 g)
Shock test	single shock: to IEC 68 part 2-27, table 2, 15 g/11 ms permanent shock: to IEC 68 part 2-29, 10 g/16 ms
Weight (without installation accessories)	LMS200/LMS291: approx. 4.5 kg LMS211/LMS221: approx. 9 kg
Dimensions	see Chapter 13 Dimensional Drawings, Page 31
Mounting	LMS200/LMS291: 7 x fastening screw threads M6, 8 mm deep 4 x fastening screw threads M8, 9 mm deep LMS211/LMS221: 4 x fastening screw threads M8, 9 mm deep 14 x slots (square nuts M5) for mounting accessories like sunshade etc.
Ambient operating temperature	LMS200/LMS291: 0 to +50 °C (with heating plate -12 to +50 °C) LMS211/LMS221: -30 to +50 °C (warming-up time approx. 120 min. at -30 °C)
Storage temperature	-30 to +70 °C
Max. rel. humidity	90 %, non condensing (IP 65)
Colour	LMS200: SICK Blue (RAL 5012) LMS209-S02: not lacquered LMS211/LMS221/LMS291: grey (RAL 7032)
<sup>5)</sup> For indicating an error, the output pulses with 1 Hz/5 Hz and different pulse ratios depending on the error type, see Table 7-4, Page 21. Special devices LMS211/221-S19/-S20: indication of front window contamination (warning/error) additionally via OUT C switching output by statical signal <sup>6)</sup> Shock absorbers (on request) are recommended for heavy vibration and impact demands (e.g. AGV applications)	

Ilustración 58. Datos técnicos [II] SICK LMS 291.

